This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

B 426838

ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING

TA
2
.S68

SOCIÉTÉ

DES

INGÉNIEURS CIVILS

IMPRIMERIE DE GUIRAUDET ET JOUAUST,
338, RUE SAINT-HONORÉ.

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ

DES

INGÉNIEURS CIVILS

FONDÉE LE 4 MARS 1848

ANNÉE 1851

Paris

RUE BUFFAULT, 26

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

(Janvier, Février et Mars 1851.)

(N° 12.)

Pendant ce trimestre, on a traité les questions suivantes :

1° Suite et fin du rapport de la commission des ponts suspendus; discussion sur ce rapport (V. les résumés des séances, p. 33, 49);

2° Lecture de la première partie du mémoire de M. Yvon Villarceau sur la théorie de la stabilité des machines locomotives en mouvement (V. le résumé des séances, p. 29);

3° Analyse des travaux de l'Institut des ingénieurs civils de Londres (V. le résumé des séances, p. 45).

Pendant ce trimestre, la Société a reçu :

De M. Bazaine, ingénieur en chef des ponts et chaussées,

1° Un exemplaire de la grande carte du chemin de fer d'Amiens à Londres par Boulogne;

2° Un exemplaire d'une carte des profils en long des divers chemins de fer unissant Paris à Londres;

3° Le dessin gravé du pont construit sur la Canche à Etaples.

De M. Bergeron, ingénieur en chef du chemin de fer de

163337

Paris à Versailles (rive gauche), une collection complète des dessins des travaux d'art de ce chemin.

De M. Goschler, une note (extraite des *Annales de la Société des ingénieurs viennois*) relative à l'emploi de la tourbe desséchée à l'air au soudage du fer extrait des minerais carbonatés.

De M. Mirecki, une note sur l'emploi des traverses en peuplier.

De M. Mayer, une note sur le prix de revient des transports sur les chemins de fer français.

De M. Nillis, un exemplaire d'un mémoire de M. Versluys sur la construction des égouts au point de vue de la salubrité publique.

De MM. Lechatelier, Eug. Flachat, J. Petiet et C. Polonceau, un exemplaire de leur *Guide du mécanicien constructeur et conducteur de machines locomotives.*

De M. Yvon Villarceau, un mémoire sur la théorie de la stabilité des machines locomotives en mouvement.

De M. Guibal, un mémoire sur un projet de chemin de fer de Mons à Nieuport.

De M. Lefrançois, deux notes relatives à la construction d'une voûte en ellipse.

De M. Laurens, une note sur la quantité d'air insufflée dans les hauts-fourneaux.

De M. Volland, des tables au moyen desquelles il a réduit à une multiplication et à une addition le calcul des largeurs d'emprises et des surfaces de profils.

De M. Vuigner, une note relative aux chemins de halage et aux berges des canaux en Angleterre et en Ecosse.

Les membres nouvellement admis sont les suivants :

Au mois de février.

MM. Stegen, présenté par MM. Alcan, Huet et Geyler.

GIRARD, présenté par MM. Ch. Callon, V. Bois et Yvon Villarceau.

EBRAY, présenté par MM. Perdonnet, Pepin-Lehalleur et Faure.

EVRARD, présenté par MM. Petiet, G. Loustau et Degousée.

THÉVENET, présenté par MM. Faure, Priestley et Piquet.

Au mois de mars.

MM. TOURNEUX (Félix), présenté par MM. Eug. Flachat, A. Barrault et V. Bois.

THÉTARD, présenté par MM. Eug. Flachat, Cavé et A. Bellier.

LISTE GÉNÉRALE DES SOCIÉTAIRES AU 1er JANVIER 1851.

Membres du Bureau.

Président :

M. Perdonnet ✻, rue Neuve-des-Mathurins, 73.

Vice-présidents :

MM. E. Flachat, ✻✻ rue de Londres, 51.
Charles Callon, rue des Vosges, 18.
C. Polonceau ✻, boulevart de l'Hôpital, 4.
Emile Vuignier ✻, rue du Faubourg-Saint-Denis, 146.

Secrétaires :

MM. Adolphe Bellier, rue Saint-Honoré, 83.
Léon Yvert, rue Bleue, 5.
Goschler, quai de l'Ecole, 26.
E. Gerber, rue Richer, 10.

Trésorier :

M. Loustau, rue Saint-Quentin, 23.

Membres du Comité.

MM. Faure, boulevart Saint-Martin, 55.
Nozo, place du Château-Rouge, 2, à Montmartre.
Houel ✻, quai de Billy, 48.
J. Petiet ✻✻, rue Lafayette, 34.
M. Alcan, rue d'Enghien, 28.
P. Seguin, rue Louis-le-Grand, 3.
Léonce Thomas ✻, rue des Beaux-Arts, 2.
Degousée, rue Chabrol, 37.
A. Salvetat, à Sèvres (Manufacture nationale).
Yvon Villarceau, rue Cassini, 14.
A. Barrault, rue de Clichy, 63.
Deligny, à Asnières.
Gouin ✻, rue Neuve-des-Mathurins, 26.
Cavé ✻, rue du Faubourg-Saint-Denis, 214.

Victor Bois, place du Havre, 14.
Stéphane Mony ✻, rue Saint-Lazare, 23.
Pepin-Lehalleur ✻, rue de la Victoire, 14.
Bergeron, rue de Lille, 79.
Knab, rue de Seine, 72.
La Salle, rue Saint-Georges, 58.

Sociétaires.

MM. Abeilard, boulevart Beaumarchais, 91.
Albrizio.
Alby, place Carline, 11, à Turin.
Alquié, rue d'Enghien, 15.
Armengaud, rue Saint-Sébastien, 45.
Arson, à Vaux (Seine-et-Oise).
Andry (Alfred), à Boussu, près Mons (Belgique).
Badarous, en Algérie.
Bardon, quai d'Austerlitz, 75.
Baumal (Henri), rue de Bercy, 2, à Bercy.
Beaumont (Victor).
Belval.
Bénard, rue des Enfants-Rouges, 11.
Benoist du Portail, rue Saint-Jacques, 75.
Berthelomey, rue de la Roquette, 90, à la Raffinerie.
Bertot, boulevart du Temple, 42.
Beugnot, à Mulhouse, maison Kœchlin.
Bevan de Massy, boulevart Montmartre, 3.
Biver, à Biache-St-Waast, près Vitry (Pas-de-Calais).
Blacher, à Avignon, Mson Gostlob, r. des Marchands, 10.
Blanche, à Puteaux (Seine).
Blard, chef de dépôt à Varades (chemin de fer de Tours à Nantes).
Blonay, chez M. Dichrich, maître de forges, à Niederbronn (Bas-Rhin).
Bonnefoi (De), rue de Vendôme, 24.
Bonnet (Félix), rue de Sèvres, 8.

Blot (Léon), au chemin de fer de Bordeaux à Tours, à Tours.
Bordet, à Remilly, par Sombernon (Côte-d'Or).
Borie, boulevart Poissonnière, 24.
Boucart, Faubourg-Poissonnière, 98 et 100.
Boudard, rue Saint-Denis, 313.
Boudsot, en Egypte.
Bougère, à Angers.
Bourcart, à Guebwiller (Haut-Rhin).
Bourdon ✻, au Creusot.
Bourgougnon, aux Batignolles, rue Notre-Dame, 1.
Bousson, à Roanne (Loire).
Boutin, chez M. Mollerat, fabricant de produits chimiques, à Pouilly-sur-Saône (Côte-d'Or).
Boutmy, rue Blanche, 36.
Bricogne, rue Ribouté, 1 *bis*.
Bridel, rue Mazagran, 8.
Bureau (Jules), rue Mayet, 18.
Buschoff, rue de Crussol, 21.
Belanger, à Fresne-sur-Escaut (Nord).
Caillé, au Creusot (hôtel du Commerce).
Caillet, quai d'Austerlitz, 75.
Calla ✻, rue Lafayette, 11.
Cambier, rue de Babylone, 5.
Chabrier, rue d'Amsterdam, 52.
Championnière, rue Ollivier, 4.
Chaplin, rue Pavé-Saint-André, 12.
Chappon, à Bar-sur-Aube.
Chauvel (Emile), à Navart, près Evreux (Eure).
Chavès, rue de l'Echiquier, 27.
Charpentier, rue du Temple, 192.
Chevalier (Emile), rue la Victoire, 48.
Chevalier (Martial), rue Chauchat, 16.
Chevandier, rue de la Victoire, 22.
Chobrzynski, rue du Nord, 11.

Clémandot, à Clichy-la-Garenne.
Comte, en Amérique.
Cornet, rue Meslay, 21.
Corot, pompe à feu de Chaillot, quai de Billy.
Courtépée, rue des Francs-Bourgeois, 7.
Crétin, rue du Faubourg-Saint-Honoré, 105.
Curtel, rue du Court-Debout, à Lille.
Daguin, rue des Francs-Bourgeois, 10.
Danré, à Stockholm (Suède), à Bollhusgrund.
Darblay, à Corbeil.
Debas, rue Bréda, 26.
Debauge ✻, à Tours (Indre-et-Loire).
Defrosse, à Tours, au chemin de fer.
Dejoly, palais de l'Assemblée nationale.
Dellisse, rue du Faubourg-Poissonnière, 98 et 100.
De la Rochette, à Givors (Rhône).
Delom (Florentin), rue Montholon, 13.
Deville, rue du Faubourg-Saint-Germain, 70.
Desmazures, boulevart Beaumarchais, 22.
D'Hamelincourt, rue Neuve-Coquenard, 26 *bis*.
Donnay, passage Sandrier, 38.
Dubied (Ed.), à Mulhouse.
Dubois, à Saint-Gaulin, près Mons (Belgique).
Ducourd, au château de Beaurepaire, à Vic, près Breuil (Allier).
Duméry, rue des Petites-Ecuries, 45.
Duolmard, à Saint-Malo (Ile-et-Vilaine).
Durenne, rue des Amandiers-Popincourt, 11.
Durocher, rue de la Verrerie, 83.
Dutilleux, à Cologne, Apostelu-Kloster, 3; à Paris, rue Louis-le-Grand, 8.
Duval (Edmond), aux forges de Paimpont, près Plelan (Ille-et-Vilaine).
Duval-Piron, rue Saint-Denis, 277.
Eck, rue du Vert-Bois, 33.

Edwards ✻, rue du Faubourg-Poissonnière, 55.
Erhard.
Estoublon, aux forges d'Ivoy, à La C.-d'Angillon (Cher)
Faure de Villat, boulevart de la Chapelle, 8.
Fèvre, rue Richer, 26.
Flachat (Adolphe), rue d'Amsterdam, 54.
Fontenay (de), boulevart Beaumarchais, 3.
Fontenay (Toni), avenue Matignon, 3.
Forquenot, à Tours (Indre-et-Loire).
Fournier (J.-B.), à Orléans (Loiret).
Fournier, rue Louis-le-Grand, 3.
Frèrejean, rue de la Tour-d'Auvergne, 21.
Fresnaye, à Maresquel, par Champagne-lez-Hesdin (Pas-de-Calais).
Gallicher, forges de Rigny, près Châteauneuf (Cher).
Gannéron, rue de Chabrol, 14.
Garnaud, rue de l'Abbaye, 14.
Gastellier, rue des Filles-du-Calvaire, 18.
Gauzenback, au Havre.
Gayrard (Gustave), rue Saint-Nicolas-d'Antin, 46.
Gentilhomme, quai de la Tournelle, 45.
Getting, avenue Dauphine, à Passy.
Geyler (Alfred), rue de Buffault, 13.
Gollnisch, rue des Petites-Ecuries, 53.
Gonssolin, à Alger.
Gouvion, au chemin de fer de St-Germain, r. St-Lazare.
Grandvoinnet, rue des Beaux-Arts, 2.
Granier.
Grenier (Achille), route de Paris, à Vincennes.
Grouvelle, rue de la Sorbonne, 5.
Grosset, à Tours.
Grun, à Guebwiller (Haut-Rhin).
Guelle, rue des Fossés-Saint-Marcel, 39.
Guénard de la Tour, aux forges de Saucourt, par Joinville (Haute-Marne).

Guérard, rue du Haut-Pavé, à Epernay.
Guettier, aux forges de Marquise (Pas-de-Calais).
Guibal, rue Pargaminières, 71, à Toulouse.
Guibal, à l'école des Mines, à Mons (Belgique).
Guillaume, à Angers.
Guntz.
Gerbon, à Epernay, rue des Fusiliers.
Hermary, à Lambres (Pas-de-Calais).
Holcroft, à Tours (Indre-et-Loire).
Holm, en Angleterre.
Hovine, boulevart Beaumarchais, 62.
Hubert, rue Blanche, 69.
Hurt, rue de Buffault, 13.
Humblot (Léon), à Metz (Moselle).
Hervier, à Saint-Germain.
Jullien, à Montataire (Oise).
Koechlin, rue de Chabrol, 63.
Klapft (Ed.), à Strasbourg.
Lachèvre, à Rouen (Seine-Inférieure).
Laborie (de), quai de Béthune, 18.
Labouverie, à Bouillon (Ardennes).
Lalo, rue Saint-André-des-Arts, 45.
Laligant, à Maresquel, par Champagne-lez-Hesdin (Pas-de-Calais).
Langlois (Ed.), rue de la Tour-d'Auvergne, 21.
Landry, à Pithiviers.
Lapersonne, rue de Paradis-Poissonnière, 44.
Lassalle, boulevart National, à Marseille.
Lasseron, à Tours.
Laurens, rue des Beaux-Arts, 2.
Laurent (Victor), à Planchay-les-Mines, près et par Champagny (Haute-Saône).
Lavalley, rue de Tivoli, 3.
Lebon (Eugène), rue Richelieu, 110.
Lecler (Achille), rue Richer, 60.

Lecouvre, rue des Francs-Bourgeois, 25.
Lecointe, rue Bréda, 22.
Lefrançois, à Pithiviers (Loiret).
Lemaire, conducteur des ponts et chaussées, rue des Réservoirs, à Versailles.
Lemaire-Teste, boulevart Beaumarchais, 79.
Lemoinne, à Bar-le-Duc.
Lepeudry, rue Montholon, 28.
Leroy, à Bar-le-Duc.
Letrange.
Lisboa.
Lichstreinsten (Paul), à Montpellier (Hérault).
Lorentz, rue Blanche, 83.
Loisel, boulevart Beaumarchais, 89.
Love, rue du Bac, 81.
Loyd, chez M. Gouin, aux Batignolles.
Limet, rue d'Enghien, 28.
Mangeon, à Melun.
Marais, à la Chapelle-Saint-Denis.
Mariotte, à Orléans (Loiret).
Mathias (Félix)✻, chemin de fer du Nord, à Paris.
Mathias (Ferdinand), à Lille (chemin de fer du Nord).
Mathieu, rue Rougemont, 10.
Marguet, à l'école industrielle de Lausanne (Suisse),
Martenot, à Ancy-le-Franc (Yonne).
Martin, à Besançon (Doubs).
Martin (Charles), à Bourg (Ain).
Maire, rue d'Enghien, 11.
Mayer, rue Notre-Dame-de-Lorette, 36.
Mélin, rue Neuve-Coquenard, 11.
Mesdach, rue Saint-Paul, 28.
Mesmet, Grande-Rue, 41, à Saumur.
Meyer, boulevart de la Madeleine, 17.
Mignon, rue de Thorigny, 8.
Mirecki, à la station d'Amiens.

Mitchell, boulevart Beaumarchais, 74.
Montcarville (de), place des Vosges, 26.
Morard, rue de Flandre, 59, à la Villette.
Moreau (Albert), rue de Lille, 21.
Morin (G.), à la Croix-Rouge, banlieue de Marseille.
Mourrau, rue des Carrières, 25, à Charenton.
Nancy, à Strasbourg (Haut-Rhin).
Nillis (Auguste), rue Blanche, 69.
Oriolle, à Saumur.
Pecquet (Nemours), rue Buffault, 7.
Petre, à Rive-de-Gier, chez M. Jackson; à Paris, rue Notre-Dame-de-Nazareth, 25.
Picard, cité de l'Union, 2.
Piquet, rue de Bondy, 52.
Planhol (de), à Braffac, près Jumeaux (Puy-de-Dôme).
Poinsot, au Conservatoire des Arts et Métiers.
Pommier (Alphonse), à San-Francisco (Californie).
Pot, Grande-Rue-Marengo, 20, à Marseille.
Pothier, rue de l'Arcade, 14.
Pottier (Ferdinand), rue des Beaux-Arts, 9.
Poupé, rue de Flandres, 57, à la Villette.
Poussin (le major), rue Richer, 43.
Priestley, rue Pavée-Saint-Antoine, 3.
Proal, rue du Pont-de-la-Réforme, 1.
Pury (de), à Neufchâtel (Suisse).
Quétil, cour des Petites-Ecuries, 16.
Raabe, à Rive-de-Gier (Loire).
Redon, à Limoges.
Regel (de), à Strasbourg (Bas-Rhin).
Reynaud (Ch.), à Cette (Hérault).
Reytier, à Epinac (Saône-et-Loire).
Rérolle, rue Saint-André-des-Arts, 13.
Rhoné, rue Saint-Lazare, 126.
Ruoltz (de), rue de Verneuil, 53.
Richard, à Vitry-le-Français.

Richard, à Aix-la-Chapelle.
Riche, rue des Marais-Saint-Martin, 95.
Rider.
Rivier, professeur de physique à Lauzanne (Suisse).
Rossire, à Mazargues, près Marseille.
Rudler, rue Jean-Goujon, 6.
Salleron, à Sens (Yonne).
Sautin, rue de Seine, 6.
Saulnier (Ernest), rue d'Enfer, 8.
Schmerber, à Mulhouse.
Schlincker, à Creutzwald (Moselle).
Scribe, en Californie.
Servel, quai de Béthune, 24.
Slavecki, garde-mine de 2e classe, à Rouen.
Sautter, rue de la Victoire, 90.
Sciama, rue Pigale, 48.
Thauvin, rue de Lancry, 10.
Thomas (Frédéric), chemin de fer de Tours à Nantes, à Tours.
Thomas (Emile), Faubourg-Poissonnière, 98 et 100.
Thomas (Pierre), Faubourg-Poissonnière, 98 et 100.
Trélat (Emile), à Melun (Seine-et-Marne).
Valério, à Vieille-Montagne, près Liége.
Vallier, à Versailles, rue Nationale, 75.
Verdavaine.
Vigneaux, à Aiguillon (Lot-et-Garonne).
Villain, rue Saint-Germain-des-Prés, 12.
Vinchon, rue de Choiseul, 25.
Vollant, à Vitry-le-Français.
Villaine (Achille de), à Roanne (Loire).
Viron, au chemin de fer de Tours à Nantes, à Tours.
Volski, quai Maison-Rouge, à Nantes.
Vuillemin, à Metz.
Weimberger, rue des Vieux-Augustins, 13.

MÉMOIRE N° XXVI (*).

Théorie de la stabilité des machines locomotives en mouvement,

PAR M. YVON VILLARCEAU.

1. Diverses causes concourent à la stabilité ou à l'instabilité des machines locomotives en mouvement. Parmi ces causes, il en est qui tiennent particulièrement à la distribution des masses dont se composent les organes de ces machines. Je me propose d'étudier les effets de ces dernières causes, et d'établir les conditions que doivent remplir les masses en mouvement pour que, sous ce point de vue, la stabilité des machines locomotives soit aussi grande que possible. Les conditions théoriques étant établies, il restera à examiner si elles sont toutes compatibles entre elles dans chaque système donné de locomotives, et de plus si, étant compatibles, elles sont toutes réalisables pratiquement. Nous reconnaîtrons que, dans cette dernière hypothèse, l'une des conditions établies présenterait de graves

(*) Ce Mémoire est un résumé de divers mémoires et notes présentés à la Société des ingénieurs civils vers la fin de 1850 et pendant l'année 1851. Nous avons cherché à en reproduire ici la substance, en réduisant la partie analytique à ce qui est strictement nécessaire pour qu'un ingénieur exercé aux opérations algébriques puisse, en effectuant celles que nous indiquerons, obtenir les résultats auxquels nous parviendrons successivement. Dans ces divers mémoires j'ai étudié d'abord les cas les plus simples, puis les cas plus compliqués. L'étendue qui m'est accordée ici me force à traiter le cas le plus général, et l'on verra s'en déduire avec la plus grande facilité les résultats qui se rapportent aux cas particuliers. Il est seulement à craindre que la complication qui en résulte nécessairement n'effraie quelques personnes; toutefois nous devons prévenir qu'elles ne rencontreront pas de sérieuses difficultés, mais seulement des longueurs inévitables. Y. V.

inconvénients, sinon des impossibilités, au point de vue du frottement et de la résistance de certaines pièces. Le manque de données sur la manière dont l'usé et autres détériorations se produisent sous l'influence des forces mises en jeu nous obligera à proposer un système d'expériences basées sur notre théorie, et sans lesquelles il est actuellement impossible d'obtenir le degré de stabilité le plus satisfaisant et présentant le moins d'inconvénients à d'autres égards.

Quelques ingénieurs anglais et allemands, M. Nollau entre autres, avaient déjà abordé cette question, lorsqu'en 1849, M. Lechatelier, ingénieur des mines, s'en est occupé de son côté. Les ingénieurs français doivent savoir gré à ce dernier des efforts persévérants qu'il a faits pour vulgariser chez nous l'emploi des contrepoids appliqués aux roues motrices des locomotives. Le succès obtenu dans les expériences faites aux chemins de fer d'Orléans et du Nord a bien vite décidé l'adoption des contrepoids sur nos lignes de chemins de fer.

A l'époque où M. Lechatelier publia son Mémoire sur la stabilité des machines locomotives, plusieurs membres de la *Société des Ingénieurs civils*, qui n'avaient pas bien saisi la théorie exposée par M. Lechatelier et qui désiraient néanmoins en faire des applications éclairées, m'engagèrent vivement à m'occuper de cette question. Des travaux scientifiques d'un autre ordre m'ont long-temps empêché de le faire, et ce n'est que depuis un an environ que j'ai été en mesure de présenter à la Société le résultat de mes premières recherches. Préalablement j'en fis part à l'un des ingénieurs du chemin du Nord, et j'appris de lui, sans surprise, que les contrepoids n'avaient pas produit tous les bons effets qu'on en avait espérés. Les mouvements que l'on se proposait de détruire ont bien à peu près disparu; mais les bandages des roues motrices s'usent encore en certains points de leur circonférence d'une manière fâcheuse. Pour faire disparaître les inconvénients de cet usé, qui atteint souvent une profondeur de 5 à 6 millimètres après un parcours de trente mille kilomètres environ, l'on est obligé de mettre les

roues sur le tour, pour en enlever les portions de la circonférence qui n'ont pas été atteintes. Il en résulte des pertes de temps et de matière, en un mot des dépenses, que les ingénieurs doivent chercher à éviter ou tout au moins à diminuer.

J'ai dit que j'avais appris ces choses sans en être surpris : en effet, la théorie de M. Lechatelier, dont on fait usage, n'indique pas toutes les conditions à remplir ; il en est plusieurs que cet ingénieur ne paraît pas avoir entrevues. Je suis porté à croire que, si ces conditions avaient été connues, et que l'on se fût efforcé de les réaliser en ce qu'elles offrent de réalisable, on aurait obtenu des mouvements plus réguliers encore, et l'usé local des bandages aurait été notablement diminué. Il ne pourrait disparaître à peu près entièrement qu'en satisfaisant à toutes les conditions que nous indiquons.

Cet usé local des bandages atteste, en même temps que la théorie l'indique, une variation dans l'action que les rails exercent sur les roues, et que réciproquement celles-ci transmettent aux rails. Si donc on pouvait parvenir à rendre ces actions constantes ou à peu près, on comprend toute l'importance que pourrait avoir ce résultat relativement à l'établissement de la voie elle-même. Les charges sensiblement permanentes étant alors plus faibles que les charges maximum qui se produisent dans l'état actuel des locomotives, il serait possible de réduire la masse de fer employée dans la construction de la voie, sans que la stabilité en fût diminuée. Je suis parvenu effectivement à fixer les conditions théoriques relatives à l'invariabilité presque complète des actions qui se développent au contact des rails et des roues.

2. Parmi les conditions dont il s'agit, il en est qui peuvent s'obtenir très aisément par la voie synthétique. Ces conditions dérivent de la considération du mouvement du centre de gravité de la locomotive. (J'ai présenté cette déduction à la Société dans une communication en date du 7 mars 1851.)

Les autres conditions se tirent de la considération des mo-

ments; on les obtiendrait aussi par la même voie, mais moins aisément.

Il est extrêmement intéressant de former les expressions des inégalités qui se produisent dans les machines locomotives en mouvement; il devient bien facile ensuite de fixer les conditions pour que ces inégalités (*) s'annulent. C'est de cette manière que j'ai procédé, en suivant la méthode analytique qui m'a paru être le moyen le plus sûr à employer dans cette recherche. En effet, il suffit d'énoncer le problème pour que sa traduction algébrique s'ensuive immédiatement. Une fois les équations écrites, la série des opérations à effectuer se trouve indiquée très clairement.

Les principes de mécanique auxquels j'ai recours sont des plus élémentaires de la dynamique. Je ne crois pas inutile de les énoncer ici : 1° *Le produit de la masse d'un élément matériel par l'accélération de sa vitesse projetée sur une droite fixe est égal à la somme des projections sur la même droite des forces qui le sollicitent;* 2° *Les actions et réactions mutuelles de deux éléments matériels sont égales et opposées.* — Je fais pourtant usage de la notion des centres de gravité, des moments des forces et des moments d'inertie; mais il me suffit à la rigueur que l'on en comprenne les définitions.

Des deux principes que je viens d'énoncer, je déduis les transformations des théorèmes concernant le mouvement du centre de gravité et les aires, pour le cas du mouvement relatif que nous avons à envisager. Je n'ai pas cru devoir renvoyer aux traités élémentaires de mécanique, et transformer les énoncés qui se trouvent dans ces traités, attendu que la dé-

(*) Parmi les inégalités qui se développent durant le mouvement, il en est que négligent ordinairement les ingénieurs : ce sont celles qui dépendent de la variation de vitesse angulaire des manivelles. J'ai eu égard à ces inégalités, ce qui était facile. De cette manière, on peut aborder la discussion de l'effet des variations de vitesse angulaire et l'étude des modifications que l'on pourrait proposer de tenter dans la distribution de la vapeur pour atténuer cet effet.

monstration des énoncés transformés n'est pas plus longue que la transformation des énoncés primitifs. Du reste, les anciens élèves de l'Ecole centrale ne possèdent pour la plupart aucune notion sur le principe des aires, et il importe de leur faciliter l'intelligence d'un théorème de mécanique sans lequel il est impossible de calculer l'intensité des forces qui se développent dans les machines pendant qu'elles fonctionnent, et, par suite, de résoudre les questions qui se rattachent à leur stabilité.

3. Les machines accouplées feront l'objet de la discussion générale ; les résultats auxquels nous parviendrons s'appliqueront encore aux machines non couplées, puisqu'il suffira d'y faire abstraction de tout ce qu'entraîne l'accouplement des roues. Les axes des cylindres y seront supposés inclinés par rapport à la voie : en faisant varier l'inclinaison convenablement, les formules s'appliqueront aussi bien aux cylindres placés à l'arrière qu'à ceux placés à l'avant de la locomotive.

Le problème étant assez compliqué, je supposerai l'axe de la voie rectiligne, et incliné à l'horizon d'un angle quelconque. En admettant que la solution qui serait relative à une courbure donnée de la voie ne coïncidât pas avec celle qui correspondrait à une voie rectiligne, on reconnaîtra qu'il serait, sinon impossible, du moins peu praticable de faire varier suivant la courbure de la voie la distribution des masses en mouvement. On voit donc qu'il faut s'en tenir à la solution correspondante à la voie rectiligne. Disons à l'avance que cette solution est indépendante de la pente de la voie, ce qu'il est facile de prévoir.

Nous serons obligés de supposer la voie rigoureusement rectiligne, c'est-à-dire que nous ferons abstraction de la flexion des rails. Pour avoir égard à cette flexion, il serait nécessaire de définir géométriquement la loi du contact d'un point donné de la circonférence des roues avec les rails, comme, par exemple, cela se pourrait si les roues étaient dentées et que le rail fût muni d'une crémaillère ; encore faudrait-il que les nombres de dents de la roue et d'un rail fussent commensurables, et

qu'à chaque parcours de la locomotive les mêmes dents fussent toujours en contact. La solution que l'on obtiendrait serait très probablement différente de celle qui convient au cas de rails inflexibles. Or, dans la pratique, tout s'oppose à la permanence d'une pareille loi des contacts : il ne paraît pas, dès lors, qu'il y ait mieux à faire que de négliger la flexion des rails.

Nous négligerons encore les effets de la flexion des ressorts de suspension. D'ailleurs, voulût-on y avoir égard, on commencerait par obtenir une première approximation en les négligeant, et l'on se servirait des résultats obtenus pour procéder à une seconde approximation, dans laquelle on en tiendrait compte. En sorte que, si, sous ce rapport, notre travail n'est pas complet, il doit cependant être considéré comme un acheminement nécessaire à une solution plus complète.

De plus, nous admettrons que les diverses pièces qui entrent dans la composition des machines locomotives soient assez résistantes pour ne point être déformées sous l'influence des forces mutuelles ou des forces extérieures qui les sollicitent, et qu'elles ne puissent prendre d'autres mouvements relatifs que ceux qui répondent aux fonctions de chacune d'elles, de manière que, pour ces pièces, on puisse faire usage des formules qui conviennent à des corps solides.

Les locomotives sont généralement formées par la réunion de deux machines séparées, alimentées par une chaudière et un foyer communs. Le plan de juxtaposition des deux machines se nomme plan méridien. Sauf les exceptions que nous allons indiquer, nous supposerons les deux machines symétriques quant à la distribution des masses par rapport au plan méridien, à cela près que l'angle des manivelles sera constamment droit. Il sera plus simple de considérer comme une seule pièce l'ensemble d'une roue et du contrepoids dont elle pourra être munie : ce sera une roue dont le centre de gravité n'est pas situé sur l'axe. Cet organe pourra, suivant les cas, être ou ne pas être assujetti à la loi de symétrie (les roues seules pourront faire exception à cette loi) ; mais, cependant,

nous supposerons égales les masses des roues et contrepoids portées sur le même essieu, et aussi les distances de leurs centres de gravité au plan méridien.

Il sera également nécessaire, pour la simplification des calculs, d'admettre, comme cela a presque toujours lieu, que chacun des organes mobiles, ou chaque partie géométriquement distincte d'un de ces organes, sont formés de deux parties symétriques par rapport aux plans parallèles au plan méridien qui passent par leurs centres de gravité.

Nous disons *partie distincte* d'un organe mobile parce que, par exemple, on ne pourrait pas, dans certaines équations, concentrer les masses d'une manivelle et de son bouton à leur centre commun de gravité, et qu'il faut, dans ces équations, écrire un terme pour la manivelle et un autre pour le bouton : ces parties distinctes d'un même organe satisfont, en effet, individuellement à la condition de symétrie qui vient d'être énoncée. Toujours dans le même but de simplification, on admettra que les centres de gravité des organes mobiles sont, en outre, situés sur leurs axes de figure. Ainsi, le centre de gravité d'une manivelle sera situé sur une perpendiculaire commune à l'axe de l'essieu et du bouton ou manneton de la manivelle. Le centre de gravité de la bielle se trouvera sur la droite qui joint le centre du manneton et celui de la tête du piston. Le centre de gravité d'une bielle d'accouplement sera situé sur la perpendiculaire commune aux axes des boutons des manivelles d'accouplement, etc.

Les masses en mouvement qui produisent les effets les plus sensibles sont les bielles, manivelles, pistons et roues munies de contrepoids. Les faibles masses, ou plus encore les faibles vitesses des organes de distribution de l'eau et de la vapeur, rendent leurs effets moins importants. Aussi, dans la question qui nous occupe, néglige-t-on les mouvements de ces organes. Nous aurions cherché à en tenir compte si les modes de transmission du mouvement dans ces derniers systèmes ne présentaient pas des variétés extrêmement nombreuses. Il serait im-

possible d'établir des formules générales qui s'appliquassent directement à ces divers systèmes. Pour cette raison, nous n'en avons pas tenu plus de compte que ne l'ont fait nos prédécesseurs. Au reste, le calcul que nous exposerons, en ce qui concerne les bielles, manivelles, pistons et roues munies de contrepoids, pourra servir de guide à ceux qui voudraient avoir égard au mouvement de pièces autres que celles-ci. Nous rangerons donc les organes de distribution de l'eau et de la vapeur dans la catégorie des *pièces fixes*, et disons de suite que, pour la symétrie des calculs, nous nommerons *demi-ensemble des pièces fixes* l'ensemble de ces pièces qui sont situées d'un même côté du plan méridien.

Toutes ces restrictions ou conventions étant préalablement établies, nous allons dire actuellement comment nous envisageons le problème de la stabilité des machines locomotives en mouvement.

DONNÉES ET ÉNONCÉ DU PROBLÈME.

4. Les données du problème consistent dans les conditions auxquelles doit être soumise toute locomotive, savoir, que *les parties relativement fixes de cet appareil, le bâti, par exemple, conservent un mouvement rectiligne, et, sinon uniforme, du moins aussi près de l'être qu'il est possible de le faire.*

Ces conditions, on le prévoit, impliquent certaines relations entre les forces extérieures qui sollicitent la locomotive et les vitesses et variations de vitesse des masses en mouvement. Théoriquement, on pourrait imaginer des dispositions de rails ou de guides présentant une résistance en quelque sorte illimitée, et telle que le mouvement rectiligne serait assuré dans tous les cas. Mais, dans la réalité, les rails ne doivent point être assujettis à présenter d'aussi grandes résistances; les boudins des roues ne doivent point être utilisés d'une manière permanente pour éviter les déviations latérales. Les relations dont nous venons de parler, étant supposées formées, donneraient la mesure des réactions que doivent opposer les rails dans tous

les sens, et, s'ils étaient effectivement incapables de les produire, on en conclurait que le mouvement rectiligne ne saurait être maintenu. Par exemple, la limite de la composante horizontale des réactions dans le sens perpendiculaire à la voie serait le produit de la composante verticale par le coefficient du frottement de glissement ; les limites de la composante verticale seraient l'une zéro, l'autre égale à la résistance du rail à la rupture, etc.

Voici maintenant comment le problème à résoudre nous paraît pouvoir être énoncé : *Les conditions relatives au mouvement rectiligne étant censées remplies, trouver les conditions sous lesquelles les réactions exercées par les rails non seulement restent beaucoup au-dessous de leurs limites, mais se maintiennent aussi constantes que possible, quelles que soient la situation des manivelles, la vitesse et les variations de la vitesse.*

La dernière partie de cet énoncé montre que la solution complète du problème devrait avoir pour conséquence de diminuer très notablement l'usé local des bandages, et de permettre la construction de la voie avec des rails moins résistants que ceux en usage aujourd'hui.

Les conditions qu'il s'agit de rechercher conduiraient, ainsi que nous le verrons, à l'usage des contrepoids, si la pratique n'en avait pas déjà montré la nécessité. Elles comprendront celles que l'on connaît aujourd'hui pour le cas des cylindres horizontaux, et qui sont relatives aux mouvements de *tangage* et de *lacet*, et, de plus, les conditions relatives aux *oscillations normales* au plan de la voie, au mouvement de *roulis* et de *galop*, conditions que l'on n'avait pas fait connaître jusqu'ici.

L'exposé de ces diverses conditions est l'objet principal de ce Mémoire. Nous pensons pouvoir nous dispenser de rechercher les limites des réactions des rails : en effet, ces réactions, si les précédentes conditions étaient satisfaites, différeraient peu de celles qui auraient lieu au repos, sous l'influence du poids de la locomotive et de la force de traction transmise au convoi. Elles n'intéressent que la pose et la résistance des rails. Ajou-

tons que, dans l'hypothèse où ces conditions seraient remplies, l'établissement de la voie pourrait être pratiqué en faisant, à très peu près, abstraction du mouvement de la locomotive, si ce n'est pour parer aux chances de déraillement provenant de causes fortuites.

PRINCIPES A APPLIQUER POUR LA SOLUTION DU PROBLÈME.

5. Les termes du problème étant acceptés, voyons maintenant comment il convient de l'aborder. Notre énoncé conduit à des conséquences que nous exposerons tout d'abord. — Si les réactions des rails dans tous les sens doivent être constantes durant le mouvement, il suit nécessairement que la somme des composantes de ces réactions, parallèles à une droite de direction quelconque, doit être constante, et que la somme des moments de ces réactions par rapport à un axe quelconque doit l'être pareillement. Or la théorie des projections montre que, pour qu'il en soit ainsi, il faut et il suffit que ces conditions soient remplies à l'égard de trois axes rectangulaires. Nous sommes donc conduits à former les expressions des trois sommes des composantes parallèles à trois axes rectangulaires et des moments autour de ces axes, puis à en tirer les conditions propres à annuler les parties variables de ces expressions.

Voici une autre manière d'envisager la question. Etant donnés les mouvements relatifs des organes de la machine et le mouvement rectiligne de translation du bâti, on se propose de rendre constante chacune des trois composantes des réactions développées par les rails. — Les équations du mouvement du centre de gravité de la locomotive, et celles des aires ou des moments, sont au nombre de six seulement; et les principes généraux de la mécanique ne peuvent point en fournir d'autres (*)

(*) On doit remarquer que l'équation des forces vives servirait seulement à déterminer le mouvement du système, mouvement que nous supposons donné. C'est pour cela que nous n'avons point à faire usage du principe des forces vives.

entre les composantes, lorsque, comme ici, l'on fait abstraction complète de l'élasticité du bâti et de celle des ressorts de suspension. Cette dernière, du reste, disons-le en passant, n'aura d'effet sensible que sur les composantes normales au plan de la voie. Or le nombre des composantes, ou plutôt le nombre des groupes de composantes réductibles à une seule, est de beaucoup supérieur à six, et la détermination de leurs valeurs individuelles présente une difficulté théorique analogue à celle de la répartition des pressions exercées sur un plan horizontal par un corps solide en repos qui s'appuie par plus de trois points.

Toutefois, concevons que l'on joigne à ces six équations un nombre suffisant de relations arbitraires entre les composantes: on pourra tirer de l'ensemble des équations la valeur de chacune de ces composantes. Les relations arbitraires dont nous parlons dépendent en réalité de l'élasticité des pièces de la locomotive et de l'état accidentel de la voie; sous ce dernier rapport elles pourront varier d'une manière discontinue d'un instant à l'autre. Mais si on les considère comme absolument arbitraires, et que l'on observe que la solution cherchée doit rester la même quels que soient les changements que ces relations viennent à subir, la solution cherchée devra convenir au cas où les relations arbitraires seraient indépendantes des variables qui entrent dans les expressions des trois sommes des composantes parallèles aux trois axes coordonnés et des sommes des moments autour de ces axes. Dans ce cas, les valeurs des composantes individuelles que l'on tirera de la résolution de l'ensemble des équations ne contiendront pas de nouvelles fonctions de ces variables. Donc une condition nécessaire pour l'invariabilité des composantes individuelles des réactions exercées par les rails est l'anéantissement des termes variables qui entrent dans les seconds membres des équations du mouvement du centre de gravité et des moments, comme nous l'avons trouvé ci-dessus. Et cette condition suffira lorsque les relations arbitraires n'introduiront pas elles-mêmes de termes variables,

mais ces relations sont étrangères à la constitution essentielle de la locomotive dans l'hypothèse de la rigidité absolue.

La discussion purement analytique à laquelle nous venons de nous livrer nous a obligés à employer le mot *arbitraire*, qui ne peut être remplacé par aucun autre dans le langage algébrique. Il convient de montrer que les relations arbitraires dont il est question répondent en réalité à des circonstances étrangères à la constitution géométrique de la locomotive. En effet, la répartition de la charge d'une locomotive sur chacune des six roues est produite par un serrage des ressorts de suspension qui reste arbitraire entre des limites assez étendues. D'un autre côté, il existe pour chaque roue une relation entre la composante horizontale perpendiculaire à la voie, la composante normale et le coefficient de frottement, relation qui dépend de l'inclinaison de la tangente commune aux courbes de contact de la jante et du rail, et aussi du sens dans lequel le glissement sur cette tangente tend à se produire. Or cette relation est purement accidentelle.

Nous pourrions ajouter que, suivant l'inclinaison relative des tangentes de contact qui répondent à deux roues montées sur le même essieu, l'élasticité des essieux et des roues joue un certain rôle. Ces diverses circonstances accidentelles et celles qui se rattachent au serrage arbitraire des ressorts de suspension répondent donc bien à ce que nous avons désigné dans le langage algébrique sous la dénomination de *relations arbitraires*.

Enfin nous aurions pu couper court à cette discussion en disant que l'hypothèse de solidité absolue et de rails rectilignes ne nous fournit pas d'autres relations que les six équations du mouvement du centre de gravité et des moments.

MISE EN ÉQUATION.

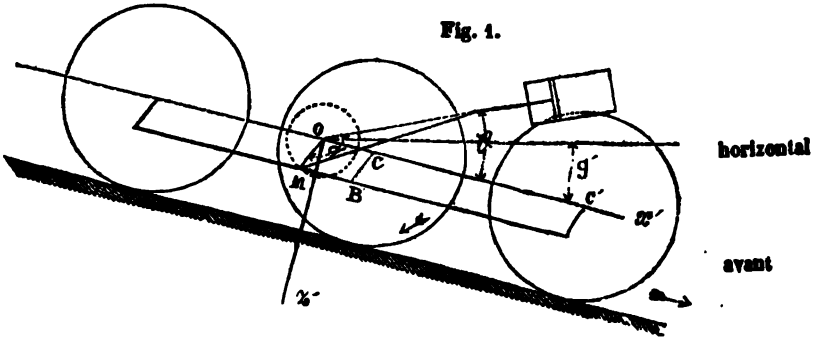
6. D'après ce qui a été dit dans le numéro précédent, nous avons à former les expressions des sommes des réactions produites par les rails décomposées suivant trois axes rectangu-

laires et des moments de ces réactions par rapport aux mêmes axes. A cet effet, soient :

m, l'un des éléments matériels dont se compose la locomotive ;

x', y', z', les coordonnées de m, rapportées à trois axes rectangulaires entraînés avec la locomotive : l'axe des x' (fig. 1

Fig. 1.



étant une droite située dans le plan méridien et passant par l'axe de l'essieu moteur principal, dont le côté positif est dirigé dans le sens positif du mouvement de translation ; l'axe des y' étant horizontal, perpendiculaire au plan méridien, et coupant l'axe des x' en un point quelconque, que nous particulariserons suivant les cas (*) ; l'axe des z', situé dans le plan mé-

(*) Nous essayons d'embrasser ici la plus grande généralité possible. Afin que nos formules s'appliquent à certaines machines employées au chemin du Nord, nous admettrons que le mouvement ne soit pas communiqué directement à la manivelle des roues motrices principales. Dans ces machines, l'une des extrémités de la bielle agit en un point M de la bielle d'accouplement, et le mouvement est communiqué aux roues motrices par un bouton B. Or tous les points des bielles d'accouplement décrivent des cercles égaux à celui que décrit le point B ; les centres de ces cercles sont d'ailleurs dans le plan CC' des axes des essieux moteurs : il s'ensuit que le point M décrit un cercle de rayon $OM = CB$, et dont le centre O est distant du centre C de la roue motrice du milieu d'une quantité $OC = MB$. C'est ce point O que nous prendrons pour origine des coordonnées. Pour que nos formules s'appliquent aux autres machines, il suffira d'y égaler à zéro la distance OC.

rédien, perpendiculairement aux deux premiers, et passant par leur point d'intersection, aura son côté positif dirigé en bas.

D'autre part, nous rapporterons le mouvement absolu de m à trois axes rectangulaires fixes ; l'axe des x sera parallèle à l'axe de la voie, son côté positif étant dans le sens positif du mouvement ; l'axe des y, perpendiculaire à l'axe de la voie et horizontal ; l'axe des z, perpendiculaire au plan de la voie, son côté positif étant dirigé en bas.

Soient :

x, y, z, les coordonnées de m rapportées aux axes fixes ;

x_0, y_0, z_0, les coordonnées de l'origine des axes mobiles rapportées aux axes fixes.

Le bâti de la machine ne devant posséder qu'un mouvement de translation, il s'ensuit que les axes mobiles doivent rester constamment parallèles aux axes fixes. Les conditions de ce parallélisme sont exprimées par les équations

$$\left.\begin{aligned} x &= x_0 + x', \\ y &= y_0 + y', \\ z &= z_0 + z'. \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Les conditions pour que l'origine des coordonnées mobiles décrive une droite parallèle à la voie sont :

$$\left.\begin{aligned} y_0 &= \text{const.}, \\ z_0 &= \text{const.} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Enfin la condition de l'uniformité du mouvement de translation serait $\frac{dx_0}{dt} = \text{const.}$ ou $\frac{d^2x_0}{dt^2} = 0$, dt désignant l'élément différentiel du temps. Cette dernière condition est difficile, sinon impossible à remplir exactement. L'équation des forces vives montre en effet que la variation de la vitesse de translation dépend du mode de distribution de la vapeur, des mouvements verticaux tant absolus que relatifs, du degré de tension des ressorts qui transmettent l'effort de traction aux wagons, etc.

Nous aurons égard aux conditions exprimées par les équations (1) et (2), mais nous ne nous astreindrons pas à satisfaire à la dernière condition. Nous regarderons donc la quan-

tité $\frac{d^2x_0}{dt^2}$ comme n'étant pas nulle, et nous nous bornerons à disposer autant que possible des coefficients de cette quantité, qui ne peut être constante, mais seulement périodique après un certain temps de marche, de manière que les termes des équations du mouvement du centre de gravité et des moments qui en sont affectés soient toujours très petits ou même nuls. La discussion de l'équation des forces vives pourrait être ensuite appliquée à la recherche des conditions que doit remplir l'appareil de distribution de la vapeur pour rendre minimum les plus grandes valeurs absolues de $\frac{d^2x_0}{dt^2}$, lorsque la vitesse moyenne que l'on veut maintenir est atteinte.

ÉQUATIONS DU MOUVEMENT DU CENTRE DE GRAVITÉ OU DE TRANSLATION.

7. Soient X, Y, Z, les sommes des composantes parallèles aux axes des x, y, z, des forces tant mutuelles qu'extérieures qui sollicitent la masse élémentaire m. Le premier principe fondamental de la dynamique, rappelé au n° 2, donne

$$X = m\frac{d^2x}{dt^2} \quad (*).$$

et, en vertu des équations (1),

$$X = m\frac{d^2x_0}{dt^2} + m\frac{d^2x'}{dt^2}. \qquad (3)$$

Si l'on fait la somme Σ de semblables équations relatives à toutes les masses m dont se compose la locomotive, et que l'on

(*) Pour faciliter la lecture de ce Mémoire aux anciens élèves de l'École centrale qui ne connaîtraient pas les dérivées différentielles d'ordres supérieurs au premier, nous devons avertir que la notation $\frac{d^2x}{dt^2}$ n'est autre chose que $\frac{d\left(\frac{dx}{dt}\right)}{dt}$ ou $\frac{dv_x}{dt}$ en employant la notation de M. Bellanger.

observe que $\frac{d^2x_0}{dt^2}$ est le même pour toutes ces masses, il vient

$$\Sigma X = \frac{d^2x_0}{dt^2}\Sigma m + \Sigma m \frac{d^2x'}{dt^2}. \qquad (4)$$

On doit remarquer qu'en vertu du 2e principe fondamental, rappelé au n° 2, celui de l'égalité entre l'action et la réaction, les composantes des forces mutuelles se détruisent deux à deux comme égales et opposées dans le premier membre de l'équation (4), en sorte que la somme ΣX ne contient plus que les composantes des actions extérieures à la locomotive.

La considération du mouvement projeté sur les axes des y et des z fournirait deux équations pareilles ; seulement, on observera que les équations (2) donnent

$$\frac{d^2y_0}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^2z_0}{dt^2} = 0. \qquad (5)$$

On aura donc simplement

$$\left.\begin{aligned} \Sigma Y &= \Sigma m \frac{d^2y'}{dt^2}, \\ \Sigma Z &= \Sigma m \frac{d^2z'}{dt^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

Nous allons faire subir aux équations (4) et (6) quelques faciles transformations.

Soit v la vitesse de translation de l'origine des coordonnées mobiles, on aura

$$\frac{dx_0}{dt} = v, \quad \frac{d^2x_0}{dt^2} = \frac{dv}{dt}. \qquad (7)$$

Soient d'autre part :

α l'angle de la manivelle située du côté des y positifs avec l'axe du piston, et mesuré du côté des x positifs vers le côté positif de l'axe des z ;

R le rayon des roues motrices.

En supposant que ces roues ne glissent pas, on aura

$$x_0 = \text{const.} + \alpha R ;$$

d'où

$$\frac{d^2x_0}{dt^2}=R\frac{d^2\alpha}{dt^2}=\frac{dv}{dt}. \qquad (8)$$

Actuellement, menons, par le centre de gravité de chacun des organes de la locomotive, trois axes rectangulaires parallèles aux axes fixes ou mobiles.

Soient : ξ, η, ζ, les coordonnées de la masse m par rapport à ces axes ;

M la masse entière de l'organe considéré ;

x, y, z, les coordonnées du centre de gravité de M par rapport aux axes mobiles liés au bâti de la locomotive : on aura

$$\left.\begin{aligned} x'&=x+\xi,\\ y'&=y+\eta,\\ z'&=z+\zeta, \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

et, relativement au même organe,

$$\Sigma m=M,\quad \Sigma m\xi=0,\quad \Sigma m\eta=0,\quad \Sigma m\zeta=0, \qquad (10)$$

en vertu de ladéfinition du centre de gravité.

Il s'ensuit, en ne considérant qu'un seul organe,

$$\left.\begin{aligned} \Sigma mx'&=Mx,\\ \Sigma my'&=My,\\ \Sigma mz'&=Mz. \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

On observera encore que, tous les points de la machine étant assujettis à se mouvoir dans des plans parallèles au plan des xz, les coordonnées y', y et η, sont des constantes, relativement au temps, pour toutes les masses m ; d'où il suit généralement

$$\frac{d^2y'}{dt^2}=0,\quad \Sigma m\frac{d^2y'}{dt^2}=0. \qquad (12)$$

(Ceci ne serait pas toujours vrai pour les molécules d'eau ou de vapeur qui peuvent être entraînées dans des trajectoires non situées dans des plans verticaux, ou non symétriques, à un instant donné, par rapport au plan méridien ; mais, vu leurs faibles masses, nous ferons abstraction du mouvement de l'eau et de la vapeur.)

Enfin, nous distinguerons dans les premiers membres des équations (4) et (6) les termes qui répondent au poids des pièces.

Soient : g le poids de l'unité de masse;

g' la pente de la voie, que, pour fixer les idées, nous supposerons positive dans le cas du mouvement direct descendant, et négative dans l'autre cas; les composantes du poids de m suivant les trois axes seront respectivement

$$mg\sin g', \quad 0, \quad mg\cos g'.$$

La masse entière de la locomotive pourra être désignée par ΣM.

En convenant que les sommes ΣX, ΣY, ΣZ, ne comprendront pas les composantes des poids des pièces, on voit qu'il faudra remplacer la première et la dernière par

$$\Sigma X + g\sin g' \Sigma M \quad \text{et} \quad \Sigma Z + g\cos g' \Sigma M.$$

En vertu de ce qui vient d'être établi ou convenu, les équations (4) et (6) deviendront

$$\left.\begin{aligned} \Sigma X &= -g\sin g' \Sigma M + \frac{dv}{dt}\Sigma M + \Sigma M \frac{d^2x}{dt^2}, \\ \Sigma Y &= 0, \\ \Sigma Z &= -g\cos g' \Sigma M + \Sigma M \frac{d^2z}{dt^2}. \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

On eût pu poser immédiatement ces équations en invoquant l'un des principes élémentaires de la théorie des forces apparentes dans les mouvements relatifs; mais nous avions besoin de poser plusieurs des équations qui nous ont servi à les établir.

ÉQUATIONS DES MOMENTS OU DES AIRES.

8. Reprenons l'équation (3) et joignons-y une équation pareille relativement à l'axe des y :

$$X = m\frac{d^2x_0}{dt^2} + m\frac{d^2x'}{dt^2},$$

$$Y = m\frac{d^2y_0}{dt^2} + m\frac{d^2y'}{dt^2}.$$

Multiplions la première de ces équations par y' et la seconde par x', puis retranchons le premier résultat du second, il viendra

$$Yx'-Xy'=m\left(x'\frac{d^2y_0}{dt^2}-y'\frac{d^2x_0}{dt^2}\right)+m\left(x'\frac{d^2y'}{dt^2}-y'\frac{d^2x'}{dt^2}\right).$$

Si nous supposons formées autant d'équations pareilles qu'il y a de masses m dans le système et que nous les ajoutions, nous aurons, en ayant égard aux facteurs communs,

$$\Sigma(Yx'-Xy')=\frac{d^2y_0}{dt^2}\Sigma mx'-\frac{d^2x_0}{dt^2}\Sigma my'+\Sigma m\left(x'\frac{d^2y'}{dt^2}-y'\frac{d^2x'}{dt^2}\right), \quad (14)$$

D'autres combinaisons du même genre, ou l'emploi des permutations tournantes, donneront

$$\left.\begin{aligned}\Sigma(Zy'-Yz')&=\frac{d^2z_0}{dt^2}\Sigma my'-\frac{d^2y_0}{dt^2}\Sigma mz'+\Sigma m\left(y'\frac{d^2z'}{dt^2}-z'\frac{d^2y'}{dt^2}\right)\\ \Sigma(Xz'-Zx')&=\frac{d^2x_0}{dt^2}\Sigma mz'-\frac{d^2z_0}{dt^2}\Sigma mx'+\Sigma m\left(z'\frac{d^2x'}{dt^2}-x'\frac{d^2z'}{dt^2}\right)\end{aligned}\right\} \quad (15)$$

Les premiers membres des équations (14) et (15) sont les sommes des moments des forces qui sollicitent les diverses masses m par rapport aux axes mobiles des z, x et y. Il est important de remarquer que les forces mutuelles disparaissent ici comme dans les équations de translation. En effet ces forces donnent lieu à des moments égaux et de sens contraire deux à deux, qui se détruisent dans les sommes. De cette manière on ne doit avoir égard qu'aux moments des forces extérieures. Ainsi, les équations des moments, comme celles de translation, se trouvent être indépendantes explicitement des forces intérieures, qui répondent ici à la tension de la vapeur, aux frottements d'axe, etc.

On pourra remarquer que les équations des moments relatives à des axes mobiles assujettis à rester constamment parallèles à des directions données ne diffèrent des équations relatives à des axes fixes de mêmes directions que par la présence des deux premiers termes des seconds membres des équations (14) et (15). Ces termes peuvent disparaître dans

deux circonstances distinctes : 1° lorsque l'on a $\Sigma mx'=0$, $\Sigma my'=0$, $\Sigma mz'=0$, c'est-à-dire lorsque l'origine des coordonnées mobiles coïncide avec le centre de gravité du système; 2° lorsque l'on a $\frac{d^2x_0}{dt^2}=0$, $\frac{d^2y_0}{dt^2}=0$, $\frac{d^2z_0}{dt^2}=0$, c'est-à-dire dans les cas où le mouvement de l'origine des axes mobiles est uniforme.

Les derniers termes des seconds membres, et qui les forment à eux seuls dans les deux cas que nous venons de mentionner, sont susceptibles d'une double interprétation que nous allons présenter ici. Considérons par exemple le dernier terme de la dernière équation des moments ; ce terme pourra s'écrire :

$$\Sigma m\frac{d\left(z'\frac{dx'}{dt}-x'\frac{dz'}{dt}\right)}{dt},$$

ce dont on s'assurera en effectuant la différentiation indiquée ici. On peut encore l'écrire comme il suit :

$$\frac{d\Sigma\left(m\frac{dx'}{dt}z'-m\frac{dz'}{dt}x'\right)}{dt}.$$

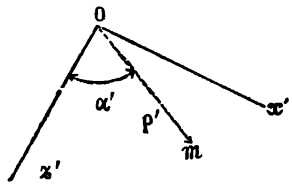
Or $m\frac{dx'}{dt}$ est la quantité de mouvement de m projetée sur l'axe des x, et $m\frac{dx'}{dt}z'$ est le moment par rapport à l'axe des y de cette quantité de mouvement projetée, moment dont le sens est celui de z vers x. Le terme suivant, en ayant égard au signe dont il est précédé, est le moment de la quantité de mouvement projetée sur l'axe des z par rapport à l'axe des y et de même sens que le précédent. La somme des deux termes est donc égale au moment de la quantité de mouvement de m par rapport à l'axe des y. Observons maintenant que les moments des forces contenus dans le premier membre de la seconde équation (15) sont relatifs à l'axe des y et de même sens que les précédents. Il en résulte que la même équation, dans les cas où le second membre se réduit à son dernier terme, peut s'énoncer ainsi :

La somme des moments des forces extérieures par rapport à un axe donné est égale à la différentielle de la somme des moments des quantités de mouvement par rapport au même axe, divisée par la différentielle du temps.

Cet énoncé justifie la dénomination de théorème des moments sous laquelle on désigne l'équation que nous venons de considérer.

Voici la seconde interprétation, qui nous sera utile dans un instant.

Soient (fig. 2) : ρ' la projection de la distance de m à l'origine des coordonnées, ou le rayon vecteur de m projeté sur le plan des zx;



(Fig. 2.)

α' l'angle de cette projection avec l'axe des z compté de z vers x ou dans le sens adopté des moments positifs : on aura

$$z' = \rho' \cos\alpha',$$
$$x' = \rho' \sin\alpha';$$

d'où

$$\frac{dz'}{dt} = -\rho' \sin\alpha' \frac{d\alpha'}{dt} + \cos\alpha' \frac{d\rho'}{dt},$$
$$\frac{dx'}{dt} = +\rho' \cos\alpha' \frac{d\alpha'}{dt} + \sin\alpha' \frac{d\rho'}{dt};$$

il s'ensuit, toutes réductions faites,

$$z' \frac{dx'}{dt} - x' \frac{dz'}{dt} = \rho'^2 \frac{d\alpha'}{dt};$$

On a donc

$$\Sigma m \left(z' \frac{d^2x'}{dt^2} - x' \frac{d^2z'}{dt^2} \right) = \frac{d.\Sigma m \rho'^2 \frac{d\alpha'}{dt}}{dt}. \qquad (15\ bis)$$

Mais $\rho'^2 d\alpha'$ est le double de l'aire décrite par la projection du rayon vecteur pendant l'instant dt, dans le sens des moments positifs ; $\rho'^2 \frac{d\alpha'}{dt}$ est le double de l'aire décrite en projection par unité de temps à l'instant considéré : donc le terme en question est égal à la différentielle de la somme des produits de chaque masse et de l'aire décrite pendant l'unité de temps par le rayon vecteur projeté, divisée par la différentielle du temps.

D'un autre côté, l'un des moments qui entrent dans le 1er membre de la 2e éq. (15) est égal à la force projetée sur le plan des zx, multipliée par la perpendiculaire abaissée de l'origine des coordonnées sur la direction de la force projetée ; en représentant cette projection par une ligne, le moment de la force sera représenté par le double de l'aire d'un triangle ayant son sommet à l'origine des coordonnées et ayant pour base la projection de la force ; cette aire devant être prise positivement ou négativement, suivant le sens du moment. Lors donc que les seconds membres de nos équations peuvent être réduits à leurs derniers termes, on énonce ces équations de la manière suivante :

La somme des aires des triangles qui ont pour sommet commun l'origine des coordonnées, et pour bases les projections des forces extérieures sur un plan donné, est égale à la différentielle de la somme des produits de chaque masse et de l'aire décrite pendant l'unité de temps par le rayon vecteur projeté sur le même plan, divisée par la différentielle du temps.

Cet énoncé explique la dénomination de principe des aires.

Ajoutons que les équations des moments ou des aires s'appellent encore équations du mouvement rotatoire.

On n'aura pas besoin de se préoccuper de retenir les énoncés précédents, attendu que nous ne ferons usage que des équations elles-mêmes.

9. Nous allons opérer dans les équations (14) et (15) les réductions qui résultent immédiatement des relations (2), (7)

et (12) ; il viendra ainsi

$$\left.\begin{aligned}
\Sigma(Yx'-Xy')&=-\frac{dv}{dt}\Sigma my'-\Sigma my'\frac{d^2x'}{dt^2}\\
\Sigma(Zy'-Yz')&=\Sigma my'\frac{d^2z'}{dt^2}\\
\Sigma(Xz'-Zx')&=+\frac{dv}{dt}\Sigma mz'+\Sigma m\left(z'\frac{d^2x'}{dt^2}-x'\frac{d^2z'}{dt^2}\right)
\end{aligned}\right\}\quad(16)$$

Une conséquence de la symétrie admise au n° 3, et de ce que nous négligeons le mouvement des molécules d'eau et de vapeur, est que l'on a, relativement à la masse entière de la locomotive,

$$\Sigma my'=0. \qquad (17)$$

En vertu des équations (9) et suivantes, le produit $y'\frac{d^2x'}{dt^2}$ devient

$$(y+\eta)\left(\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{d^2\xi}{dt^2}\right)=y\frac{d^2x}{dt^2}+y\frac{d^2\xi}{dt^2}+\eta\frac{d^2x}{dt^2}+\eta\frac{d^2\xi}{dt^2};$$

d'où, en multipliant par m et faisant la somme étendue à l'un des organes de la machine,

$$\Sigma my'\frac{d^2x'}{dt^2}=y\frac{d^2x}{dt^2}\Sigma m+y\Sigma m\frac{d^2\xi}{dt^2}+\frac{d^2x}{dt^2}\Sigma m\eta+\Sigma m\eta\frac{d^2\xi}{dt^2},$$

ou bien, à cause de $\Sigma m=M$, $\Sigma m\frac{d^2\xi}{dt^2}=0$, $\Sigma m\eta=0$,

$$\Sigma my'\frac{d^2x'}{dt^2}=My\frac{d^2x}{dt^2}+\Sigma m\eta\frac{d^2\xi}{dt^2}.$$

Le terme $\Sigma m\eta\frac{d^2\xi}{dt^2}$ peut être regardé comme nul dans les locomotives. En effet, il est nul d'abord pour les pièces fixes ; quant aux pièces mobiles ou *parties distinctes* d'un organe mobile, dont nous avons parlé au n° 3, ces pièces sont symétriques par rapport à un plan vertical passant par leur centre de gravité, en sorte qu'il existe toujours deux masses m égales pour lesquelles $\frac{d^2\xi}{dt^2}$ ayant la même valeur, les ordonnées η sont égales et de signes contraires.

Si nous convenons comme plus haut de séparer, parmi les forces, celles qui proviennent de l'action de la pesanteur, le terme $-\Sigma Xy'$ devrait être changé en $-\Sigma Xy' - g\sin g'\Sigma my'$; mais nous avons déjà trouvé $\Sigma my' = 0$ pour la masse entière de la locomotive. En étendant maintenant les sommes Σ au système entier, la première équation (16) deviendra

$$\Sigma(Yx' - Xy') = -\Sigma My\frac{d^2x}{dt^2}. \qquad (18)$$

Passons à la 2e équation (16). Le facteur $y'\frac{d^2x'}{dt^2}$ devient, en vertu des équations (9),

$$(y+\eta)\left(\frac{d^2z}{dt^2}+\frac{d^2\zeta}{dt^2}\right) = y\frac{d^2z}{dt^2}+y\frac{d^2\zeta}{dt^2}+\eta\frac{d^2z}{dt^2}+\eta\frac{d^2\zeta}{dt^2}.$$

Multiplions par m, et faisons, comme plus haut, la somme étendue seulement à la masse de l'un des organes, il vient

$$\Sigma my'\frac{d^2x'}{dt^2} = y\frac{d^2z}{dt^2}\Sigma m + y\Sigma m\frac{d^2\zeta}{dt^2} + \frac{d^2z}{dt^2}\Sigma m\eta + \Sigma m\eta\frac{d^2\zeta}{dt^2};$$

ou encore, à cause de $\Sigma m = M$, $\Sigma m\frac{d^2\zeta}{dt^2} = 0$, $\Sigma m\eta = 0$,

$$\Sigma my'\frac{d^2x'}{dt^2} = My\frac{d^2z}{dt^2} + \Sigma m\eta\frac{d^2\zeta}{dt^2}.$$

La remarque faite tout à l'heure à l'égard de $\Sigma m\eta\frac{d^2\xi}{dt^2}$ s'applique à $\Sigma m\eta\frac{d^2\zeta}{dt^2}$ qui s'annule par les mêmes motifs.

Le terme $\Sigma Zy'$, qui devrait être changé en $\Sigma Zy' + g\cos g'\Sigma my'$, se réduit à $\Sigma Zy'$ lorsqu'on l'applique à la locomotive entière.

Etendons les sommes Σ au système entier, la seconde équation (16) deviendra

$$\Sigma(Zy' - Yz') = +\Sigma My\frac{d^2z}{dt^2}. \qquad (19)$$

Il reste à transformer la 3e équation (16).

La partie du facteur $\Sigma mz'$ qui se rapporte à un organe de la locomotive est évidemment Mz. Quant au dernier terme, il

vient, en vertu des équations (9),

$$(z+\zeta)\left(\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{d^2\xi}{dt^2}\right)-(x+\xi)\left(\frac{d^2z}{dt^2}+\frac{d^2\zeta}{dt^2}\right)=$$
$$=+z\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}+\zeta\frac{d^2x}{dt^2}-\frac{d^2z}{dt^2}$$
$$+z\frac{d^2\xi}{dt^2}-x\frac{d^2\zeta}{dt^2}+\zeta\frac{d^2\xi}{dt^2}-\xi\frac{d^2\zeta}{dt^2}.$$

En multipliant par m et faisant la somme étendue à l'un des organes de la locomotive, il vient

$$\Sigma m\left(z'\frac{d^2x'}{dt^2}-x'\frac{d^2z'}{dt^2}\right)=\left(z\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}\right)\Sigma m+\frac{d^2x}{dt^2}\Sigma m\zeta-\frac{d^2z}{dt^2}\Sigma m\xi$$
$$+z\Sigma m\frac{d^2\xi}{dt^2}-x\Sigma m\frac{d^2\zeta}{dt^2}+\Sigma m\left(\zeta\frac{d^2\xi}{dt^2}-\xi\frac{d^2\zeta}{dt^2}\right),$$

ou bien,

à cause de $\Sigma m=M$, $\Sigma m\zeta=0$, $\Sigma m\xi=0$, $\Sigma m\frac{d^2\xi}{dt^2}=0$, $\Sigma m\frac{d^2\zeta}{dt^2}=0$,

$$\Sigma m\left(z'\frac{d^2x'}{dt^2}-x'\frac{d^2z'}{dt^2}\right)=M\left(z\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}\right)+\Sigma m\left(\zeta\frac{d^2\xi}{dt^2}-\xi\frac{d^2\zeta}{dt^2}\right).$$

Le dernier terme de cette expression doit encore être transformé. Soient : ρ'' la projection sur le plan des zx, de la distance de m à l'origine des coordonnées mobiles qui passent par le centre de gravité de M, ou bien la distance de m à l'axe des y, qui passe par ce centre ; α'' l'angle de cette projection avec l'axe des z compté de z vers x : on aura, de la même manière que nous avons obtenu l'équation (15 *bis*),

$$\Sigma m\left(\zeta\frac{d^2\xi}{dt^2}-\xi\frac{d^2\zeta}{dt^2}\right)=\frac{d.\Sigma m\rho''^2\frac{d\alpha''}{dt}}{dt}.$$

Toutes les masses m se mouvant dans des plans parallèles au plan des zx, leurs distances ρ'' à l'axe y qui passe par le centre de gravité de l'organe M sont des longueurs constantes. En outre, soient : γ'' l'angle qu'une droite prise arbitrairement dans un plan parallèle au plan des xz, et liée à l'organe en mouvement, fait avec l'axe des z dans le sens de z à x ; γ' l'angle

constant du rayon vecteur ρ'' avec cette droite, en sorte que l'on ait

$$\alpha''=\gamma'+\gamma'',$$

il viendra

$$\frac{d\alpha''}{dt}=\frac{d\gamma''}{dt}.$$

La dérivée $\frac{d\gamma''}{dt}$ est la vitesse angulaire de rotation du corps M autour d'un axe parallèle à l'axe des y. Cette quantité étant commune à toutes les masses m, il s'ensuit

$$\Sigma m\rho''^2\frac{d\alpha''}{dt}=\frac{d\gamma''}{dt}\Sigma m\rho''^2.$$

La quantité $\Sigma m\rho''^2$ est le moment d'inertie de la masse M par rapport à un axe parallèle à y et qui passe par le centre de gravité de M; nous le désignerons suivant l'habitude par MI^2. L'équation précédente étant différentiée, le terme qui nous occupe devient simplement

$$\Sigma m\left(\xi\frac{d^2\xi}{dt^2}-\xi\frac{d^2\zeta}{dt^2}\right)=MI^2\frac{d^2\gamma''}{dt^2}.$$

La dérivée seconde $\frac{d^2\gamma''}{dt^2}$ est ce que l'on appelle accélération de la vitesse angulaire par unité de temps.

En ne considérant donc qu'un seul organe de la machine, on a

$$\Sigma m\left(x'\frac{d^2x'}{dt^2}-x'\frac{d^2z'}{dt^2}\right)=M\left(x\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}\right)+MI^2\frac{d^2\gamma''}{dt^2}.$$

Il convient encore de séparer dans le premier membre de l'équation (16) les termes qui dépendent de l'action de la pesanteur. Il faudra, pour cela, ajouter à ce membre, ou, ce qui est préférable, retrancher au second, les termes

$$g\sin\gamma'\Sigma mz'-g\cos\gamma'\Sigma mx',$$

qui se réduisent, lorsque l'on ne considère qu'un seul organe, à

$$g\sin\gamma' Mz-g\cos\gamma' Mx.$$

La 3e équation (16) devient donc finalement

$$\Sigma(Xx'-Zx')=-g\sin g'\Sigma Mz+g\cos g'\Sigma Mx+\frac{dv}{dt}\Sigma Mz$$
$$+\Sigma M\left(z\frac{d^2x}{dt}-x\frac{d^2z}{dt^2}\right)+\Sigma MI^2\frac{d^2\gamma''}{dt^2}. \quad (20)$$

Les équations (18), (19) et (20), sont les transformées qu'il s'agissait d'obtenir. Ces équations, jointes aux trois équations (13), vont servir de base aux développements que nous allons bientôt entreprendre.

Observons qu'elles ne sont pas particulières aux locomotives, mais qu'elles conviennent à toute machine remplissant les conditions de symétrie auxquelles sont assujetties les roues, et dont certaines pièces auxquelles on rapporte les mouvements relatifs sont animées d'un mouvement rectiligne quelconque, parallèle à l'axe des x.

ÉQUATION DES FORCES VIVES.

10. Nous ne ferons pas usage de l'équation des forces vives pour établir les conditions de l'emploi des contrepoids. Cependant, si l'on voulait calculer les variations qu'éprouvent les sommes des projections des réactions des rails, et de leurs moments, dans une machine équilibrée plus ou moins imparfaitement, il serait nécessaire d'avoir recours à l'équation des forces vives, en l'absence d'indications instrumentales sur les variations de vitesse angulaire de la manivelle. Dans cette circonstance, la quantité $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ que renfermeront les équations développées des mouvements de translation et des moments ne pourrait être effectivement obtenue qu'à l'aide de l'équation des forces vives. Au lieu de la déduire de celle qui répond au mouvement absolu, nous la formerons directement pour le mouvement relatif.

Multiplions l'équation (3) par dx', puis par dy', dz', deux équations pareilles relatives aux axes des y et des z, et faisons

Σ somme étendue à toutes les masses du système, il viendra, en ayant égard aux équations (5),

$$\Sigma(X dx' + Y dy' + Z dz') = \frac{d^2 x_0}{dt^2} \Sigma m dx' + \Sigma m \left(\frac{dx'}{dt} \frac{d^2 x'}{dt} + \frac{dy'}{dt} \frac{d^2 y'}{dt} + \frac{dz'}{dt} \frac{d^2 z'}{dt} \right) \quad (21)$$

Occupons-nous d'abord du premier membre.

Ce premier membre exprime la somme des travaux élémentaires dus aux forces tant intérieures qu'extérieures, mais estimés au moyen des déplacements relatifs aux axes mobiles. Le travail dû aux actions mutuelles, tel que frottements intérieurs, travail de la vapeur, etc., conserve donc la signification ordinaire ; mais il n'en est plus ainsi du travail des forces extérieures en général. Ainsi, le travail dû à la traction transmise au convoi et celui de la résistance de l'air sont nuls, attendu que les points d'application de ces forces n'ont aucun mouvement relatif, du moins en ce qui concerne les organes que nous avons appelés pièces fixes. D'un autre côté, le travail dû aux composants des actions des rails parallèles à la voie, et qui est nul dans le mouvement absolu, acquiert ici une importance considérable.

Soit $F + F_1$ la somme des composantes parallèles à l'axe des x des actions exercées par les rails ; R étant le rayon des roues motrices, et $d\alpha$ l'angle dont elles tournent sans glisser dans le temps dt ; on aura, pour le déplacement longitudinal des points de contact des roues et des rails,

$$dx' = -R d\alpha,$$

et pour le travail de ces forces

$$-(F + F_1) R d\alpha.$$

Le travail de la composante de la pesanteur parallèle à x est, pour la masse m,

$$mg \sin g' dx',$$

et pour un organe de masse M,

$$g \sin g' \Sigma m dx' = g \sin g' M dx,$$

en vertu de (11).

La partie de $\Sigma Y dy'$, qui répond aux forces extérieures, est

nulle, puisque les mouvements relatifs ont lieu dans des plans perpendiculaires à l'axe des y.

Le travail des forces extérieures contenu dans $\Sigma Z dx'$ ne comprend point le travail de la composante normale de l'action des rails, parce que le déplacement parallèle aux x des points de contact des roues et des rails est une quantité infiniment petite du second ordre ; mais il comprend : 1° le travail de la composante de la pesanteur, que l'on trouvera être égal pour un organe à $g\cos g' M dz$; 2° le travail dû au frottement de roulement ; 3° le travail négatif dû à la pression de l'air sur la vapeur et la fumée qui s'échappent, puis le travail positif dû à l'introduction de l'air par la grille.

Désignons par $d\mathrm{T}_m$ le travail élémentaire dû aux actions mutuelles, c'est-à-dire travail de la vapeur, frottements intérieurs, travail des ressorts, augmenté, pour plus de simplicité, des termes dus à la pression de l'air sur les fluides de la machine. Le premier membre de l'équation (21) deviendra

$$-(\mathrm{F}+\mathrm{F}_1)\mathrm{R}d\alpha + g\sin g' \Sigma \mathrm{M} dx + g\cos g' \Sigma \mathrm{M} dz + d\mathrm{T}_m.$$

Soient $-\mathrm{Q}$ la composante de la résistance à la traction produite par le convoi, et $-\mathrm{Q}'$ celle de la résistance de l'air, suivant l'axe des x : la première équation (13) donnera, en y développant la valeur de $\Sigma \mathrm{X}$,

$$\mathrm{F}+\mathrm{F}_1-(\mathrm{Q}+\mathrm{Q}') = -g\sin g' \Sigma \mathrm{M} + \frac{dv}{dt}\Sigma \mathrm{M} + \Sigma \mathrm{M}\frac{d^2x}{dt^2}.$$

D'un autre côté, en supposant toujours qu'il n'y ait pas glissement, on aura

$$\mathrm{R}d\alpha = v dt.$$

Éliminant donc $\mathrm{F}+\mathrm{F}_1$ entre les deux précédentes équations, le premier membre de l'équation (21) deviendra

$$\Sigma(\mathrm{X}dx' + \mathrm{Y}dy' + \mathrm{Z}dz') = -(\mathrm{Q}+\mathrm{Q}')v dt + g\sin g'(v dt \Sigma \mathrm{M} + \Sigma \mathrm{M} dx) + g\cos g' \Sigma \mathrm{M} dz + d\mathrm{T}_m - v dt \Sigma \mathrm{M}\frac{d^2x}{dt^2} - v dv \Sigma \mathrm{M}.$$

Le second membre de l'équation (21) se réduit tout d'abord à

$$\frac{dv}{dt}\Sigma \mathrm{M} dx + \Sigma m\left(\frac{dx'}{dt}\frac{d^2x'}{dt} + \frac{dz'}{dt}\frac{d^2z'}{dt}\right).$$

Le second de ces termes doit être transformé. En vertu des équations (9), il vient

$$dx'^2+dy'^2=(dx+d\xi)^2+(dz+d\zeta)^2$$
$$=dx^2+dz^2+2(dxd\xi+dzd\zeta)+d\xi^2+d\zeta^2.$$

Multipliant par m, puis faisant la somme étendue à la masse M de l'un des organes, on aura, en ayant égard aux facteurs communs et aux sommes qui s'annulent,

$$\Sigma m(dx'^2+dz'^2)=M(dx^2+dz^2)+\Sigma m(d\xi^2+d\zeta^2);$$

mais, en se reportant aux notations du numéro précédent, on aura

$$d\xi^2+d\zeta^2=\rho''^2d\alpha''^2,$$

et par suite

$$\Sigma m(d\xi^2+d\zeta^2)=MI^2d\gamma''^2;$$

d'où

$$\Sigma m(dx'^2+dz'^2)=M(dx^2+dz^2)+MI^2d\gamma''^2.$$

Différentions cette équation et divisons par $2dt$, il viendra, relativement à l'un des organes de masse M,

$$\Sigma m\left(\frac{dx'}{dt}\frac{d^2x'}{dt}+\frac{dz'}{dt}\frac{d^2z'}{dt}\right)=M\left(\frac{dx}{dt}\frac{d^2x}{dt}+\frac{dz}{dt}\frac{d^2z}{dt}\right)+MI^2\frac{d\gamma''}{dt}\frac{d^2\gamma''}{dt}.$$

Enfin nous désignerons par $\Sigma m\omega d\omega$ le terme de l'équation des forces vives qui répond au mouvement relatif des fluides dans la locomotive.

Réunissant ces divers résultats et divisant tout par dt, on obtient, relativement à la masse entière de la locomotive

$$\left.\begin{aligned}\frac{dT_m}{dt}+g\sin\theta'\left(v\Sigma M+\Sigma M\frac{dx}{dt}\right)+g\cos\theta'\Sigma M\frac{dz}{dt}=&+(Q+Q')v+v\Sigma M\frac{d^2x}{dt^2}\\&+v\frac{dv}{dt}\Sigma M+\frac{dv}{dt}\Sigma M\frac{dx}{dt}\\&+\Sigma M\left(\frac{dx}{dt}\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{dz}{dt}\frac{d^2z}{dt^2}\right)\\&+\Sigma MI^2\frac{d\gamma''}{dt}\frac{d^2\gamma''}{dt^2}+\Sigma m\omega\frac{d\omega}{dt}\end{aligned}\right\}\quad(2$$

Telle est l'équation des forces vives qu'il convient d'appliquer aux machines locomotives. En supposant qu'il n'y ait pas glissement, toutes les variables qui entrent dans cette équation et leurs dérivées pourront s'exprimer en fonction de α et de ses dérivées, lorsque le mode de distribution de la vapeur sera donné. Tous les termes de cette équation deviendront alors divisibles par $\frac{d\alpha}{dt}$, et l'on en pourra tirer la valeur de $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$.

On parviendrait exactement au résultat que nous venons d'obtenir en partant de l'équation des forces vives établie pour le cas du mouvement absolu et y substituant les expressions (9) des coordonnées ; mais la transformation serait un peu plus longue que le calcul précédent.

Nous renverrons pour quelques explications concernant les quantités $d\mathrm{T}_m$ et $\Sigma m v dw$ à la deuxième partie d'un mémoire sur l'emploi de l'air chaud dans les hauts-fourneaux, que nous avons présenté à la Société des ingénieurs civils.

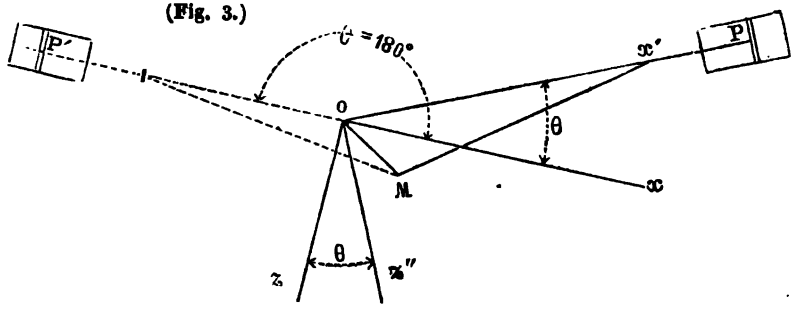
TRANSFORMATION DES COORDONNÉES, POUR AVOIR ÉGARD A L'INCLINAISON DES CYLINDRES.

11. Les coordonnées que renferment les équations (13), (18), (19), (20) et (22), sont toutes relatives aux axes mobiles parallèle et perpendiculaires à la voie ; x', y', z', désignent particulièrement les coordonnées des points de contact des roues et des rails, tandis que x, y, z, sont les coordonnées du centre de gravité d'un organe quelconque, fixe ou mobile ; la dérivée $\frac{d\gamma''}{dt}$ est la vitesse angulaire d'un organe mobile mesurée dans le sens de z à x, ou en sens contraire du mouvement de rotation de la manivelle ; $\frac{d^2\gamma''}{dt^2}$ est l'accélération de cette vitesse angulaire.

Nous prendrons pour origine des coordonnées le milieu de la droite qui joint les centres des cercles décrits par les extrémités des bielles. Cette origine se confondra avec le milieu de l'axe des roues motrices principales dans la plupart des machines.

Les nouveaux axes que nous allons employer auront la même origine ; l'axe des y coïncidera également avec le précédent ;

(Fig. 3.)



mais nous prendrons pour nouvel axe des x un axe parallèle à celui des cylindres, et pour axe des z un axe faisant avec l'ancien un angle égal et de même sens que celui du nouvel et de l'ancien axe des x. Nous désignerons provisoirement par x'' et z'' les coordonnées des centres de gravité des masses M rapportées à ces axes.

Définissons l'inclinaison des cylindres.

O (fig. 3) étant le centre du cercle décrit par l'extrémité M de la bielle, P la tête du piston élevé au dessus de l'avant de la machine, nous désignerons par θ l'inclinaison $x''Ox = z''Oz$. Dans le cas où les cylindres seraient à l'arrière sur le prolongement de Ox, l'angle θ deviendrait égal à 180°. A l'aide de cette convention, nos formules conviendront à toute situation donnée des cylindres.

Les formules connues de la transformation des coordonnées nous fournissent les relations

$$\left.\begin{aligned} x &= x''\cos\theta + z''\sin\theta, \\ z &= z''\cos\theta - x''\sin\theta ; \end{aligned}\right\} \quad (23)$$

on en tire, par la différentiation,

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \cos\theta\frac{dx''}{dt} + \sin\theta\frac{dz''}{dt} \\ \frac{dz}{dt} &= \cos\theta\frac{dz''}{dt} - \sin\theta\frac{dx''}{dt} ; \end{aligned}\right\} \quad (24)$$

d'où

$$x\frac{dx}{dt}-x\frac{dz}{dt}=x''\frac{dx''}{dt}-x''\frac{dz''}{dt},$$

$$\frac{dx^2}{dt^2}+\frac{dz^2}{dt^2}=\frac{dx''^2}{dt^2}+\frac{dz''^2}{dt^2};$$

puis, en différentiant de nouveau,

$$\left.\begin{aligned}
\frac{d^2x}{dt^2}&=\cos\theta\frac{d^2x''}{dt^2}+\sin\theta\frac{d^2z''}{dt^2}\\
\frac{d^2z}{dt^2}&=\cos\theta\frac{d^2z''}{dt^2}-\sin\theta\frac{d^2x''}{dt^2}\\
x\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}&=x''\frac{d^2x''}{dt^2}-x''\frac{d^2z''}{dt^2}\\
\frac{dx}{dt}\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{dz}{dt}\frac{d^2z}{dt^2}&=\frac{dx''}{dt}\frac{d^2x''}{dt^2}+\frac{dz''}{dt}\frac{d^2z''}{dt^2}.
\end{aligned}\right\}\quad(25)$$

Telles sont les valeurs qu'il faut actuellement substituer dans les équations (13), (18), (19), (20) et (22) : nous allons opérer cette substitution, et nous supprimerons ensuite les accents, afin de ne pas compliquer l'écriture ; seulement nous n'oublierons pas que les coordonnées x et z se rapporteront à des axes l'un parallèle et l'autre perpendiculaire aux axes des cylindres. Ajoutons encore que nous nous réserverons plus tard la faculté de rapporter les positions de quelques masses aux anciens axes, et qu'il suffira pour cela de faire $\theta=0$ dans les termes correspondants. En effet, il vient, dans cette hypothèse, en vertu des équations (23), $x=x''$, $z=z''$.

Voici le résultat de la substitution :

Équations du mouvement de translation.

$$\left.\begin{aligned}
\Sigma X&=\left(\frac{dv}{dt}-g\sin g'\right)\Sigma M+\cos\theta\,\Sigma M\frac{d^2x}{dt^2}+\sin\theta\,M\frac{d^2z}{dt^2}\quad[x]\\
\Sigma Y&=0\quad[y]\\
\Sigma Z&=-g\cos g'\Sigma M+\cos\theta\,\Sigma M\frac{d^2z}{dt^2}-\sin\theta\,\Sigma M\frac{d^2x}{dt^2}.\quad[z]
\end{aligned}\right\}\quad(26)$$

Équations du mouvement rotatoire.

$$\left.\begin{aligned}
\Sigma(Yx'-Xy') &= -\cos\theta\Sigma My\frac{d^2x}{dt^2}-\sin\theta\Sigma My\frac{d^2z}{dt^2} && (z)\\
\Sigma(Zy'-Yz') &= +\cos\theta\Sigma My\frac{d^2z}{dt^2}-\sin\theta\Sigma My\frac{d^2x}{dt^2} && (x)\\
\Sigma(Xz'-Zx') &= \left[g\cos(g'-\theta)-\sin\theta\frac{dv}{dt}\right]\Sigma Mx-\left[g\sin(g'-\theta)-\cos\theta\frac{dv}{dt}\right]\Sigma Mz\\
&\quad +\Sigma M\left(z\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}\right)+\Sigma MI^2\frac{d^2\gamma''}{dt^2} && (y)
\end{aligned}\right\}(27)$$

Les notations $[x]$, $[y]$, $[z]$, rappellent que les équations auxquelles elles se rapportent sont celles du mouvement de translation parallèlement aux trois axes x, y, z, primitifs.

Les notations (z), (x), (y), rappellent que les équations correspondantes sont les équations du mouvement de rotation autour des axes z, x et y.

(Nous nous dispenserons d'opérer les substitutions dans l'équation des forces vives, attendu que nous n'en ferons pas usage dans le présent Mémoire.)

Il s'agit actuellement de calculer les valeurs des différents termes qui entrent dans ces équations, et de les exprimer en fonctions de l'angle α de la manivelle avec l'axe du piston et des deux premières dérivées de cette quantité.

CALCUL DES COORDONNÉES x, z_2 D'UN POINT PRIS SUR L'AXE DE LA BIELLE, DES DÉRIVÉES DE CES COORDONNÉES, et de l'accélération de vitesse angulaire de la bielle.

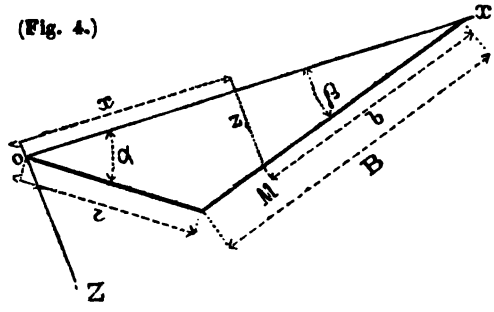
12. Il nous sera facile de déduire, à l'aide de ces déterminations, celles qui se rapportent au centre de gravité même de la bielle et au piston : c'est pourquoi nous préférons traiter la question analytique qui concerne un point quelconque pris sur l'axe de la bielle.

Soient, (fig. 4) :

r le rayon de la manivelle située du côté des y positifs, ou

plus généralement le rayon du cercle décrit par l'extrémité de la bielle;

(Fig. 4.)



α l'angle de r avec l'axe des x compté de x vers z, ou en sens contraire de l'angle γ'' du n° 9;

B la longueur de la bielle;

b la distance d'un point M, pris sur l'axe de la bielle, à la tête du piston, comptée de celle-ci vers le bouton de la manivelle;

x, y, z, les coordonnées du point M;

β l'angle aigu de la bielle avec le prolongement de l'axe des x, positif pour α compris entre 0° et 180°, négatif pour α compris entre 180° et 360°; l'angle β croît dans le sens de l'angle γ'', et, d'après la signification de cet angle, on a

$$\frac{d\gamma''}{dt} = \frac{d\beta}{dt} \tag{28}$$

relativement à la bielle.

Les coordonnées du point M en fonction des angles α et β, et de la distance b, sont

$$\left.\begin{aligned} x &= r\cos\alpha + (B - b)\cos\beta, \\ z &= b\sin\beta = \frac{r}{B}\, b\sin\alpha. \end{aligned}\right\} \tag{29}$$

La seconde de ces valeurs de z résulte de la proportionnalité des sinus, qui fournit la relation

$$\sin\beta = \frac{r}{B}\sin\alpha. \tag{30}$$

En différentiant les équations (29), il vient

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -r\sin\alpha\frac{d\alpha}{dt} - (\mathrm{B}-b)\sin\beta\frac{d\beta}{dt}, \\ \frac{dz}{dt} &= +\frac{r}{\mathrm{B}}b\cos\alpha\frac{d\alpha}{dt}. \end{aligned}\right\} \quad (31)$$

Au moyen de ces valeurs et des précédentes, on obtient

$$z\frac{dx}{dt} - x\frac{dz}{dt} = -r^2\frac{b}{\mathrm{B}}\frac{d\alpha}{dt} - r(\mathrm{B}-b)\frac{b}{\mathrm{B}}\left(\sin\alpha\sin\beta\frac{d\beta}{dt} + \cos\alpha\cos\beta\frac{d\alpha}{dt}\right).$$

Différentions l'équation (30), nous aurons

$$\cos\beta\frac{d\beta}{dt} = \frac{r}{\mathrm{B}}\cos\alpha\frac{d\alpha}{dt}. \quad (32)$$

Cette dernière et l'équation (30) donnent

$$\sin\alpha\sin\beta\frac{d\beta}{dt} + \cos\alpha\cos\beta\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\mathrm{B}}{r}(\sin^2\beta + \cos^2\beta)\frac{d\beta}{dt} = \frac{\mathrm{B}}{r}\frac{d\beta}{dt};$$

on a donc simplement

$$z\frac{dx}{dt} - x\frac{dz}{dt} = -r^2\frac{b}{\mathrm{B}}\frac{d\alpha}{dt} - b(\mathrm{B}-b)\frac{d\beta}{dt}; \quad (33)$$

d'où ensuite, par la différentiation,

$$z\frac{d^2x}{dt^2} - x\frac{d^2z}{dt^2} = -r^2\frac{b}{\mathrm{B}}\frac{d^2\alpha}{dt^2} - b(\mathrm{B}-b)\frac{d^2\beta}{dt^2}. \quad (34)$$

Il resterait encore à différentier les équations (31) et (32) et à éliminer l'angle β et ses dérivées $\frac{d\beta}{dt}$, $\frac{d^2\beta}{dt^2}$; mais l'obligation où nous serons de combiner deux à deux les termes de même forme qui sont relatifs aux organes correspondants ou conjugués des deux machines séparées par le plan méridien, nous détermine à recourir à l'emploi des séries. Cette combinaison serait impraticable sous forme finie, à cause du radical introduit par $\cos\beta$. Notre mémoire déposé aux archives de la Société contient les expressions des dérivées sous forme finie; nous nous dispensons de les reproduire ici, attendu que nous ne devons point en faire usage.

EXPRESSIONS DES COORDONNÉES LINÉAIRES DES CENTRES DE GRAVITÉ DE LA BIELLE ET DU PISTON, DE LEURS DÉRIVÉES, ET DE LA VITESSE ANGULAIRE DE LA BIELLE, en séries ordonnées suivant les sinus et cosinus des multiples de l'angle de la manivelle avec l'axe du piston.

13. L'angle β étant nécessairement aigu, son cosinus est essentiellement positif; on tire de l'équation (30)

$$\cos^{\pm 1}\beta = \left(1 - \frac{r^2}{B^2}\sin^2\alpha\right)^{\pm\frac{1}{2}}.$$

La quantité entre parenthèses peut être remplacée par

$$1 - \frac{r^2}{2B^2}(1 - \cos 2\alpha).$$

Posons

$$\sin\varphi = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{r}{B}; \tag{35}$$

cette même parenthèse se changera en

$$1 - \sin^2\varphi + \sin^2\varphi\cos 2\alpha = \cos^2\varphi + \sin^2\varphi\cos 2\alpha;$$

et, si nous convenons que φ soit toujours un angle aigu, afin que son cosinus reste positif, il viendra

$$\cos^{\pm 1}\beta = \cos^{\pm 1}\varphi(1 + \tang^2\varphi\cos 2\alpha)^{\pm\frac{1}{2}}.$$

Nous développerons cette double expression au moyen de la formule de Newton, et nous aurons

$$\left.\begin{aligned}
\cos\beta &= \cos\varphi\left(1 + \frac{1}{2}\tang^2\varphi\cos 2\alpha - \frac{1}{2.4}\tang^4\varphi\cos^2 2\alpha + \frac{1.3}{2.4.6}\tang^6\varphi\cos^3 2\alpha\right.\\
&\qquad\left. - \frac{1.3.5}{2.4.6.8}\tang^8\varphi\cos^4 2\alpha + \text{etc.}\right),\\
\frac{1}{\cos\beta} &= \frac{1}{\cos\varphi}\left(1 - \frac{1}{2}\tang^2\varphi\cos 2\alpha + \frac{1.3}{2.4}\tang^4\varphi\cos^2 2\alpha - \frac{1.3.5}{2.4.6}\tang^6\varphi\cos^3 2\alpha\right.\\
&\qquad\left. + \frac{1.3.5.7}{2.4.6.8}\tang^8\varphi\cos^4 2\alpha - \text{etc.}\right).
\end{aligned}\right\} \tag{36}$$

L'angle φ est la valeur de β qui répond à $\alpha = \frac{\pi}{4}$ ou 45°, et à $\alpha = 3\frac{\pi}{4}$ ou 135°.

On peut exprimer $\text{tang}^2\varphi$ directement en fonction de r et B comme il suit :

$$\text{tang}^2\varphi = \frac{r^2}{2B^2 - r^2}. \qquad (37)$$

La première série (36) contient les puissances entières de $\cos 2\alpha$; et comme celles-ci s'expriment, au moyen de formules connues, par les premières puissances des cosinus des multiples entiers de 2α, nous pouvons poser

$$\cos\beta = \cos\varphi \Sigma_0^\infty A_i \cos 2i\alpha. \qquad (38)$$

La seconde série (36) s'exprimerait de la même manière au moyen de termes de la forme $A'_i \cos 2i\alpha$: il s'ensuit que la fonction $\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}$ qui entre dans l'expression de $\frac{d\beta}{dt}$, équation (32), se compose de termes de la forme $A'_i \cos\alpha \cos 2i\alpha$. Or on a, par les formules trigonométriques,

$$\cos\alpha \cos 2i\alpha = \frac{1}{2}\cos(2i-1)\alpha + \frac{1}{2}\cos(2i+1)\alpha.$$

Le premier des facteurs de cette forme se réduirait évidemment à $\cos\alpha$: nous pouvons donc poser encore

$$\frac{\cos\alpha}{\cos\beta} = \frac{1}{\cos\varphi} \Sigma_0^\infty B_i \cos(2i+1)\alpha. \qquad (39)$$

Les sommes Σ comprises dans les expressions (38) et (39) doivent être considérées comme formées en donnant à l'indice i toutes les valeurs entières, depuis et y compris zéro jusqu'à l'infini.

Si l'on se reporte aux développements (36) et qu'on ait égard aux formules de transformation des puissances de cosinus en cosinus de multiples, on observera que les coefficients A_i et B_i sont des fonctions de $\text{tang}^2\varphi$, dans lesquelles la plus faible puissance de cette quantité est i. En convenant de prendre $\text{tang}\varphi$ pour type des quantités du premier ordre de petitesse, on devra considérer les coefficients A_i et B_i comme étant de l'ordre $2i$. Nous ne présenterons point le calcul de ces coefficients, que chacun pourra effectuer sans difficulté, attendu

que le seul d'entre eux qui reste dans les équations de condition est le coefficient B_0. Il est d'ailleurs associé à $\cos\varphi$, sous la forme $\frac{B_0}{\cos\varphi}$, valeur qui peut, dans le cas des locomotives, être remplacée avec une très grande approximation par $\frac{1}{\sqrt{\cos\varphi}}$. Mais comme ces coefficients pourraient être employés au calcul des réactions des rails dans le cas de machines imparfaitement équilibrées, nous donnerons dans la note ci-jointe les expressions de ces mêmes coefficients (*).

Au moyen des expressions (38) et (39), dont il nous suffisait à la rigueur de justifier la forme, il vient d'abord, par les équations (29) et (32),

$$x = r\cos\alpha + (B - b)\cos\varphi \sum_0^\infty A_i \cos 2i\alpha,$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{r}{B\cos\varphi} \sum_0^\infty B_i \cos(2i+1)\alpha \frac{d\alpha}{dt}.$$

(*) En posant, pour abréger,

$$\varphi_1 = \frac{1}{2}\tan^2\varphi,$$

on aura :

$$A_0 = 1 - \frac{1}{2.4}\frac{2}{1}\varphi_1^2 - \frac{1.3.5}{2.4.6.8}\frac{4.3}{1.2}\varphi_1^4 - \frac{1.3.5.7.9}{2.4.6.8.10.12}\frac{6.5.4}{1.2.3}\varphi_1^6 - \text{etc.}$$

$$A_1 = \varphi_1 + \frac{3}{4.6}\frac{3}{1}\varphi_1^3 + \frac{3.5.7}{4.6.8.10}\frac{5.4}{1.2}\varphi_1^5 + \frac{3.5.7.9.11}{4.6.8.10.12.14}\frac{7.6.5}{1.2.3}\varphi_1^7 + \text{etc.}$$

$$A_2 = -\frac{1}{4}\varphi_1^2 - \frac{3.5}{4.6.8}\frac{4}{1}\varphi_1^4 - \frac{3.5.7.9}{4.6.8.10.12}\frac{6.5}{1.2}\varphi_1^6 - \text{etc.}$$

$$A_3 = +\frac{3}{4.6}\varphi_1^3 + \frac{3.5.7}{4.6.8.10}\frac{5}{1}\varphi_1^5 + \frac{3.5.7.9.11}{4.6.8.10.12.14}\frac{7.6}{1.2}\varphi_1^7 + \text{etc.}$$

$$A_4 = -\frac{3.5}{4.6.8}\varphi_1^4 - \frac{3.5.7.9}{4.6.8.10.12}\frac{6}{1}\varphi_1^6 - \text{etc.}$$

$$A_5 = +\frac{3.5.7}{4.6.8.10}\varphi_1^5 + \frac{3.5.7.9.11}{4.6.8.10.12.14}\frac{7}{1}\varphi_1^7 + \text{etc.}$$

$$A_6 = -\frac{3.5.7.9}{4.6.8.10.12}\varphi_1^6 - \text{etc.}$$

$$A_7 = +\frac{3.5.7.9.11}{4.6.8.10.12.14}\varphi_1^7 + \text{etc.}$$

. . . . . .

On en tire par la différentiation

$$\frac{dx}{dt} = -[r\sin\alpha + 2(B-b)\cos\varphi \Sigma_0^\infty iA_i \sin 2i\alpha]\frac{d\alpha}{dt},$$

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} = +\frac{r}{B\cos\varphi}\Sigma_0^\infty B_i \cos(2i+1)\alpha . \frac{d^2\alpha}{dt^2},$$

$$-\frac{r}{B\cos\varphi}\Sigma_0^\infty (2i+1)B_i \sin(2i+1)\alpha . \frac{d\alpha^2}{dt^2},$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -[r\sin\alpha + 2(B-b)\cos\varphi \Sigma_0^\infty iA_i \sin 2i\alpha]\frac{d^2\alpha}{dt^2},$$

$$-[r\cos\alpha + 4(B-b)\cos\varphi \Sigma_0^\infty i^2 A_i \cos 2i\alpha]\frac{d\alpha^2}{dt^2}.$$

Ces coefficients sont d'ailleurs liés entre eux par les relations

$$A_2 = +\frac{1}{5}\left(2A_0 - 2\frac{A_1}{\varphi_1}\right)$$

$$A_3 = -\frac{1}{7}\left(1A_1 + 4\frac{A_2}{\varphi_1}\right)$$

$$A_4 = -\frac{1}{9}\left(3A_2 + 6\frac{A_3}{\varphi_1}\right)$$

$$A_5 = -\frac{1}{11}\left(5A_3 + 8\frac{A_4}{\varphi_1}\right)$$

. . . . . .

$$A_{i+1} = -\frac{1}{2i+3}\left((2i-3)A_{i-1} + 2i\frac{A_i}{\varphi_1}\right),$$

au moyen desquelles les coefficients se déduiraient successivement des deux premiers, si ces formules n'exigeaient pas l'emploi d'un grand nombre de chiffres pour donner de bons résultats. Toutefois, on en tire la combinaison suivante, qui peut servir à vérifier l'ensemble des calculs :

$$A_1(1+\tfrac{1}{2}\varphi_1) + (1+2\varphi_1)[2A_2 + 3A_3 + 4A_4 + \ldots\ldots + (i-2)A_{i-1}]$$

$$+\tfrac{1}{2}\varphi_1[(2i-1)A_{i-1} + (2i+1)A_i] + (i-1)A_{i-1} = A_0\varphi_1.$$

Les coefficients B^i s'obtiendront indirectement de la manière suivante. Soit

$$\frac{\cos\varphi}{\cos\beta} = \Sigma_0^\infty C_i \cos 2i\alpha ;$$

la comparaison des développements de $\frac{\cos\beta}{\cos\varphi}$ et $\frac{\cos\varphi}{\cos\beta}$, équations (36), montre que l'on passe du premier au second, en multipliant les termes affectés des

L'équation (34) donnera ensuite très aisément

$$x\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}=-\frac{r^2b}{B}\frac{d^2\alpha}{dt^2}-\frac{rb(B-b)}{B\cos\varphi}\Sigma_0^{\infty}B_i\cos(2i+1)\alpha.\frac{d^2x}{dt^2},$$

$$+\frac{rb(B-b)}{B\cos\varphi}\Sigma_0^{\infty}(2i+1)B_i\sin(2i+1)\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}.$$

---

puissances successives de $\tang^2\varphi$ ou des coefficients

$$\varphi_1,\quad \varphi_1^2,\quad \varphi_1^3,\quad \varphi_1^4,\ldots\quad \varphi_1^n,$$

respectivement par $\quad -1,\ -3,\ -5,\ -7,\ldots\ -(2n-1).$

Les coefficients C_i se déduiront de A_i en multipliant généralement la puissance $n^{ième}$ de φ_1 par $2n-1$; il vient de la sorte

$$C_0=1+\frac{1.3}{2.4}\frac{2}{1}\varphi_1^2+\frac{1.3.5.7}{2}\frac{4.3}{4.6.8}\frac{4.3}{1.2}\varphi_1^4+\frac{1.3.5.7.9.11}{2.4.6.8.10.12}\frac{6.5.4}{1.2.3}\varphi_1^6+\text{etc.}$$

$$C_1=-\varphi_1-\frac{3.5}{4.6}\frac{3}{1}\varphi_1^3-\frac{3.5.7.9}{4.6.8.10}\frac{5.4}{1.2}\varphi_1^5-\frac{3.5.7.9.11.13}{4.6.8.10.12.14}\frac{7.6.5}{1.2.3}\varphi_1^7-\text{etc.}$$

$$C_2=+\frac{3}{4}\varphi_1^2+\frac{3.5.7}{4.6.8}\frac{4}{1}\varphi_1^4+\frac{3.5.7.9.11}{4.6.8.10.12}\frac{6.5}{1.2}\varphi_1^6+\text{etc.}$$

$$C_3=-\frac{3.5}{4.6}\varphi_1^3-\frac{3.5.7.9}{4.6.8.10}\frac{5}{1}\varphi_1^5-\frac{3.5.7.9.11.13}{4.6.8.10.12.14}\frac{7.6}{1.2}\varphi_1^7-\text{etc.}$$

$$C_4=+\frac{3.5.7}{4.6.8}\varphi_1^4+\frac{3.5.7.9.11}{4.6.8.10.12}\frac{6}{1}\varphi_1^6+\text{etc.}$$

$$C_5=-\frac{3.5.7.9}{4.6.8.10}\varphi_1^5-\frac{3.5.7.9.11.13}{4.6.8.10.12.14}\frac{7}{1}\varphi_1^7-\text{etc.}$$

$$C_6=+\frac{3.5.7.9.11}{4.6.8.10.12}\varphi_1^6+\text{etc.}$$

$$C_7=-\frac{3.5.7.9.11.13}{4.6.8.10.12.14}\varphi_1^7-\text{etc.}$$

. . . . . .

Les coefficients B_i se déduisent des précédents par les relations :

$$B_0=C_0+\frac{1}{2}C_1$$

$$B_1=\frac{1}{2}(C_1+C_2)$$

$$B_2=\frac{1}{2}(C_2+C_3)$$

. . . . . .

$$B_i=\frac{1}{2}(C_i+C_{i+1})$$

On en tire, pour le calcul direct de B_0,

$$B_0=1-\frac{1}{2}\varphi_1+\frac{1.3}{2.4}\frac{2}{1}\varphi_1^2-\frac{1.3.5}{2.4.6}\frac{3}{1}\varphi_1^3+\frac{1.3.5.7}{2.4.6.8}\frac{4.3}{1.2}\varphi_1^4-\frac{1.3.5.7.9}{2.4.6.8.10}\frac{5.4}{1.2}\varphi_1^5+\text{etc.}$$

Résumons actuellement les diverses formules que nous venons d'obtenir, en ayant le soin d'y séparer le premier terme des sommes Σ qui répond à l'indice $i=0$. De cette manière, il

---

Si l'on suppose B_0 calculé, on pourra calculer les autres coefficients au moyen de la série A_i, en se servant de la formule générale que voici :

$$B_i = B_{-i} - i\frac{A}{\varphi_1}.$$

Ceci suppose que les coefficients A_i seront calculés en tenant compte, dans les développements, des termes de l'ordre supérieur d'une unité à celui auquel l'exactitude des résultats définitifs est fixée d'avance.

On devra remarquer la convergence rapide de nos séries dans le cas des machines locomotives. En effet, le rapport $\frac{r}{B}$ est presque toujours égal à $\frac{1}{5}$, ou du moins en diffère peu; l'équation (37) donne alors $\tang^2\varphi = \frac{1}{49}$, d'où $\varphi_1 = \frac{1}{98}$, ou $\varphi_1 = 0{,}010\,2041$. En calculant avec cette valeur la quantité $\frac{B_0}{\cos\varphi}$, on trouve 1,005 077 ; la valeur approchée $\frac{1}{\sqrt{\cos\varphi}}$, que nous proposons de lui substituer, est dans ce cas 1,005 063. On voit donc que l'erreur sera toujours insensible dans la pratique.

Voici maintenant les valeurs numériques des coefficients A_i, B_i, C_i, pour les machines dans lesquelles la longueur de la bielle est égale à cinq fois le rayon de la manivelle :

$A_0 = +0{,}9999740$	$B_0 = +0{,}9949751$	$C_0 = +1{,}0000781$
$A_1 = +0{,}0102045$	$B_1 = -0{,}0050640$	$C_1 = -0{,}0102064$
$A_2 = -0{,}0000260$	$B_2 = +0{,}0000387$	$C_2 = +0{,}0000780$
$A_3 = +0{,}0000001$	$B_3 = -0{,}0000003$	$C_3 = -0{,}0000007$
. . . . .	. . . . .	. . . . .

Ces valeurs montrent que l'on pourra toujours se borner, dans la pratique, à l'emploi des deux premiers coefficients de chaque série.

Il existe, entre les divers coefficients dont nous venons de nous occuper et leurs dérivées prises par rapport à φ_1, des relations que nous ne pouvons qu'indiquer ici. Les coefficients A_0, B_0, C_0, s'expriment très aisément au moyen des fonctions elliptiques. Enfin, ajoutons que ces coefficients, qui peuvent être utiles dans une foule de cas relatifs aux systèmes articulés, pré-

viendra, relativement au point M et à l'accroissement de vitesse angulaire de la bielle,

$$\left.\begin{aligned}
x&=(B-b)A_0\cos\gamma+r\cos\alpha+(B-b)\cos\gamma\,\Sigma_1^\infty A_i\cos 2i\alpha,\\
z&=r\frac{b}{B}\sin\alpha,\\
\frac{d^2x}{dt^2}&=-[r\sin\alpha+2(B-b)\cos\gamma\,\Sigma_1^\infty iA_i\sin 2i\alpha]\frac{d^2\alpha}{dt^2},\\
&\quad-[r\cos\alpha+4(B-b)\cos\gamma\,\Sigma_1^\infty i^2A_i\cos 2i\alpha]\frac{d\alpha^2}{dt^2},\\
\frac{d^2z}{dt^2}&=r\frac{b}{B}\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}-r\frac{b}{B}\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2},\\
z\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}&=-r^2\frac{b}{B}\frac{d^2\alpha}{dt^2}-\frac{rb(B-b)}{B\cos\gamma}[B_0\cos\alpha+\Sigma_1^\infty B_i\cos(2i+1)\alpha]\frac{d^2\alpha}{dt^2}\\
&\quad+\frac{rb(B-b)}{B\cos\gamma}[B_0\sin\alpha+\Sigma_1^\infty(2i+1)B_i\sin(2i+1)\alpha]\frac{d\alpha^2}{dt^2},\\
\frac{d^2\gamma''}{dt^2}&=\frac{d^2\beta}{dt^2}=\frac{r}{B\cos\gamma}[B_0\cos\alpha+\Sigma_1^\infty B_i\cos(2i+1)\alpha]\frac{d^2\alpha}{dt^2}\\
&\quad-\frac{r}{B\cos\gamma}[B_0\sin\alpha+\Sigma_1^\infty(2i+1)B_i\sin(2i+1)\alpha]\frac{d\alpha^2}{dt^2}.
\end{aligned}\right\}\quad(40)$$

Ces formules sont celles qu'il s'agissait d'obtenir. En y faisant $b=B'$, (cette dernière lettre désignant la distance du centre de gravité de la bielle à la tête du piston), nous aurons tous les termes qui répondent à la bielle. Nous nous dispenserons de faire ici ce changement; il suffit d'avertir qu'il doit être fait plus tard.

Quant au mouvement du piston, soit a la distance de son centre de gravité à la tête, mesurée dans le sens des x positifs: il est évident que pour obtenir les termes qui s'y rapportent il faudra faire, dans les formules (40), $b=0$, puis ajouter a à l'abscisse x et faire abstraction de $\frac{d^2\gamma''}{dt^2}$, quantité essentiellement nulle pour le piston.

---

sentent une grande analogie, dans leurs relations et leur mode de dérivation, avec ceux auxquels donne naissance le développement de la fonction perturbatrice dans la mécanique céleste.

On aura de cette manière, relativement au piston :

$$\left.\begin{aligned} x &= a + BA_0\cos\varphi + r\cos\alpha + B\cos\varphi\Sigma_1^{\infty}A_i\cos 2i\alpha, \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= -[r\sin\alpha + 2B\cos\varphi\Sigma_1^{\infty}iA_i\sin 2i\alpha]\frac{d^2\alpha}{dt^2}, \\ &\quad -[r\cos\alpha + 4B\cos\varphi\Sigma_1^{\infty}i^2A_i\cos 2i\alpha]\frac{d\alpha^2}{dt^2}. \end{aligned}\right\} \quad (41)$$

Tous les autres termes sont nuls.

Nous pourrions déduire des formules (40) les valeurs qui sont relatives à la manivelle; mais comme nous avons à considérer d'autres organes de même espèce, nous présenterons les expressions générales qui s'y rapportent.

COORDONNÉES ET DÉRIVÉES RELATIVES AUX ORGANES DONT LES CENTRES DE GRAVITÉ ONT UN MOUVEMENT CIRCULAIRE LIÉ A CELUI DE LA MANIVELLE MOTRICE.

14. Ces organes sont les manivelles, leurs boutons, les bielles d'accouplement et les roues motrices principales ou accouplées, en comprenant la masse des contre-poids dans celle de ces dernières.

Les centres des cercles décrits par les centres de gravité de ces pièces sont situés sur une droite parallèle à la voie et passant par l'origine des coordonnées. Nous prendrons cette dernière droite pour axe des abscisses, ce qui exigera, conformément aux remarques du n° 11, que l'on fasse explicitement $\cos\theta = 1$ et $\sin\theta = 0$ dans les termes des équations (26) et (27) qui se rapportent à ces organes, ou tout simplement que l'on se serve à leur égard des seconds membres des équations (13), (18), (19) et (20), dans lesquelles les coordonnées se rapportent à des axes parallèle et perpendiculaires à la voie.

Les ordonnées des centres des cercles décrits par les centres de gravité seront conséquemment nulles.

Observons encore que les liaisons des pièces dont nous nous occupons, avec la manivelle motrice, sont telles que leurs mouvements angulaires autour des centres des cercles décrits sont

égaux à celui de la manivelle motrice elle-même. Les vitesses angulaires de rotation autour d'axes parallèles aux y et passant par les centres de gravité sont aussi égales à celle de la manivelle motrice, excepté pour les bielles d'accouplement, dont la vitesse de rotation est nulle.

Ceci posé, soient généralement :

l l'abscisse du centre du cercle décrit par le centre de gravité,

ρ la distance du centre de gravité au centre du cercle,

ε l'angle constant de ρ avec le rayon de la manivelle motrice compté dans le même sens que α.

Nous aurons (Voir fig. (1), n° 6) :

$$\left.\begin{aligned} x &= l + \rho\cos(\alpha+\varepsilon-\theta), \\ z &= \rho\sin(\alpha+\varepsilon-\theta); \end{aligned}\right\} \quad (42)$$

d'où

$$\frac{dx}{dt} = -\rho\sin(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d\alpha}{dt},$$

$$\frac{dz}{dt} = +\rho\cos(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d\alpha}{dt};$$

puis

$$z\frac{dx}{dt} - x\frac{dz}{dt} = -l\rho\cos(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d\alpha}{dt} - \rho^2\frac{d\alpha}{dt}.$$

En différentiant ces trois dernières équations, il viendra

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\rho\sin(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d^2\alpha}{dt^2} - \rho\cos(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d\alpha^2}{dt^2}, \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= +\rho\cos(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d^2\alpha}{dt^2} - \rho\sin(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d\alpha^2}{dt^2}, \\ z\frac{d^2x}{dt^2} - x\frac{d^2z}{dt^2} &= -l\rho\cos(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d^2\alpha}{dt^2} + l\rho\sin(\alpha+\varepsilon-\theta)\frac{d\alpha^2}{dt^2} - \rho^2\frac{d^2\alpha}{dt^2}. \end{aligned}\right\} \quad (43)$$

D'un autre côté, si l'on excepte les bielles d'accouplement, qui n'ont pas de mouvement de rotation autour de leur centre de gravité, on aura

$$\frac{d^2\gamma''}{dt^2} = -\frac{d^2\alpha}{dt^2},$$

attendu que l'angle γ'' est compté dans le sens opposé à celui

de l'angle α; mais afin de comprendre tous les cas dans une formule unique, si nous désignons par n' le rapport de la vitesse angulaire de rotation à celle de la manivelle principale, nous écrirons :

$$\frac{d^2\gamma''}{dt^2} = -n'\frac{d^2\alpha}{dt^2}, \qquad (44)$$

n' étant nul pour les bielles d'accouplement, et égal à l'unité pour les autres pièces.

Les manivelles et bielles d'accouplement sont toujours disposées de manière que le rayon ρ soit parallèle à celui qui répond à la manivelle motrice; seulement il arrive que ce rayon ρ se trouve disposé tantôt dans le même sens, tantôt dans le sens contraire. Il faudra donc faire, pour ces pièces, $\varepsilon = 0$ dans le premier cas, et $\varepsilon = 180°$ dans le second. Par suite nous devrons remplacer les quantités $\sin(\alpha + \varepsilon - \theta)$ et $\cos(\alpha + \varepsilon - \theta)$ respectivement par $\pm\sin(\alpha - \theta)$ et $\pm\cos(\alpha - \theta)$ dans les termes des équations (42) et (43) lorsque nous les appliquerons à ces pièces.

Occupons-nous actuellement des roues non accouplées et des demi-essieux. Nous ne confondons pas en une seule masse celle d'une roue et du demi-essieu correspondant, attendu que l'ensemble de ces deux pièces ne jouit pas de la propriété d'être symétrique par rapport à un plan parallèle au plan méridien, et passant par le centre de gravité commun.

Soient l et n les coordonnées parallèles aux x et z des axes de ces pièces. Par la raison que leur centre de gravité coïncide avec l'axe de figure, on aura simplement

$$x = l, \quad z = n. \qquad (45)$$

Les dérivées et combinaisons de dérivées de ces quantités sont toutes nulles.

L'angle γ'' étant compté en sens contraire de l'angle α, et n' ayant la même signification que ci-dessus, on aura encore

$$\frac{d^2\gamma''}{dt^2} = -n'\frac{d^2\alpha}{dt^2}. \qquad (46)$$

quations (26) et (27) des mouven

DÉSIGNATION DES ORGANES.	Masse M	Moment d'inertie autour d'un axe passant par le centre de gravité et parallèle à l'axe des	Equation [z] $\cos\theta\, M\frac{d^2z}{dt^2} - \sin\theta\, M\frac{d^2x}{dt^2}$	
Bielle.	M'	$M'I'^2$	$\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2} + M'r\frac{B'}{B}\cos\theta\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	+
			$\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2} - M'r\frac{B'}{B}\cos\theta\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$	+
			$B')\sin\theta.2\cos\varphi\Sigma_1^\infty iA_i\sin 2i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	+
			$B')\sin\theta.4\cos\varphi\Sigma_1^\infty i^2A_i\cos 2i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}$	+
Piston.	M''	»	$\theta\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	+
			$\theta\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$	+
			$\theta.2\cos\varphi\Sigma_1^\infty iA_i\sin 2i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	+
			$\theta.4\cos\varphi\Sigma_1^\infty i^2A_i\cos 2i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}$	+
Manivelle, Bouton de manivelle, Bielle d'accouplement (**).	M'''	$M'''I'''^2$	$C''')\cos\theta\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	+
			$C''')\sin\theta\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	−
			$C''')\cos\theta\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$	+
			$C''')\sin\theta\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$	+
Roue non accouplée; partie distincte d'un demi-essieu.	M^v	M^vI^{v2}	0	
Demi-ensemble des pièces fixes.	M	»	0	
Roue motrice, y compris le contrepoids.	μ	$\mu\iota^2$	$\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	+
			$\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	+
			$\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$	+
			$\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$	−

omptées parallèlement et perpendiculairemen

Relativement aux demi-essieux des roues motrices, on aura

$$n=0, \quad n'=1.$$

Quant aux roues non accouplées et à leurs demi-essieux, R′ désignant le rayon de ces roues, les valeurs précédentes deviendront

$$n=R-R', \quad n'=\frac{R}{R'},$$

en supposant que les roues ne glissent pas.

Il nous reste à dire un mot des pièces fixes.

Nous désignerons par M_f la moitié de la masse des pièces fixes réunies, et par L_f et N_f les coordonnées du centre de gravité de M_f, parallèles aux x et z. Leurs dérivées sont nulles, ainsi que celle de la vitesse angulaire, puisque ces pièces n'ont pas de mouvement relatif.

Tableau des termes des seconds membres des équations (26) et (27) relatifs à chaque espèce particulière d'organe situé du côté des y positifs, et Sommes des termes de même forme.

18. Les formules que nous avons réunies dans les deux numéros précédents sous les marques (40) à (46) donnent les valeurs des termes des équations (26) et (27), ou de leurs équivalentes qui sont relatives à chaque espèce particulière d'organe faisant partie de la machine située du côté des y positifs. Elles n'exigent d'autre soin que d'y introduire les valeurs particulières des masses, dimensions, etc. La formation de ces termes revient à peu près à une simple transcription. Toutefois, afin d'être sûr de n'omettre aucun terme et aussi de ne pas trop fatiguer l'attention ultérieurement, nous avons cru indispensable de présenter en un tableau l'ensemble des divers termes dont il est question.

Le tableau ci-joint n'exige que peu d'explications pour être compris.

La première colonne contient la désignation des organes ; les six colonnes suivantes indiquent les lettres qui servent à repré-

senter les valeurs particulières des quantités inscrites en tête de chaque colonne.

Pour compléter ces indications, nous rappellerons que B désigne la longueur de la bielle, et B′ la distance de son centre de gravité à la tête du piston.

r est le rayon de la manivelle.

R est celui des roues motrices.

n' désigne le rapport des vitesses de rotation à celle de la manivelle motrice.

n' est égal à l'unité pour les manivelles et boutons de manivelle, et nul pour les bielles d'accouplement.

N^v désigne l'ordonnée z des pièces tournantes dont le centre de gravité coïncide avec l'axe de rotation; N^v est nulle pour toute autre pièce que les roues non accouplées et leurs essieux. R′ étant le rayon de ces roues, on a $N^v = R - R'$ et $n' = \frac{R}{R'}$; n' est égal à l'unité pour toutes les autres pièces du même genre.

Plusieurs des quantités désignées par des lettres, accents, ou indices différents, pourront dans beaucoup de cas se trouver égales; nous devions, pour donner à nos formules la plus grande généralité, tenir compte de différences qui n'existent pas toujours en réalité.

Afin d'éviter la reproduction des termes de même forme, nous avons compris sous une désignation générale unique les termes de même espèce qui répondent aux manivelles, boutons de manivelles et bielles d'accouplement. Le double signe qui accompagne ces termes provient de $\varepsilon = 0°$ ou $180°$: on prendra donc le signe $+$ ou le signe $-$, suivant que le rayon du cercle décrit par le centre de gravité sera de même sens ou de sens opposé au rayon de la manivelle motrice. Nous avons développé les quantités $\sin(\alpha - \theta)$ et $\cos(\alpha - \theta)$ contenues dans les équations (42) et (43).

Enfin, dans les termes relatifs aux roues motrices et contrepoids, nous avons développé aussi $\sin(\alpha + \varepsilon - \theta)$ et $\cos(\alpha + \varepsilon - \theta)$;

seulement, l'angle $\varepsilon - \theta$ y a été remplacé par un angle unique e :

$$e = \varepsilon - \theta. \tag{47}$$

Ayant notre tableau sous les yeux, il sera facile de faire la somme des termes de même espèce, ordonnée suivant les sinus et cosinus des multiples de α, et d'y séparer les termes affectés des facteurs $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ et $\frac{d\alpha^2}{dt^2}$. En faisant ces sommes, qui seront uniquement relatives à l'une des deux machines dont se compose la locomotive, nous réunirons sous le signe Σ les termes qui se rapportent à un même genre d'organes, attendu que le tableau n'en renferme qu'un seul pour chaque genre.

Posons, pour abréger :

$$\left.\begin{aligned} u_0 &= M'r + M''r, & u_1 &= \Sigma \pm M'''C''', \\ u'_0 &= M'r\frac{B'}{B}, & & \\ v_0 &= (M'r + M''r)\Lambda, & v_1 &= \Sigma \pm M'''C'''\Lambda''', \\ v'_0 &= M'r\frac{B'}{B}\Lambda, & & \\ w_0 &= [M'I'^2 - M'B'(B - B')]\frac{r}{B}\frac{B_0}{\cos\varphi}, & w_1 &= \Sigma \pm M'''C'''L''', \end{aligned}\right\} \tag{48}$$

$$k = M'(B - B') + M''B; \tag{49}$$

nous aurons :

Équation $[x]$,

Somme des termes $+\cos\theta\, M\frac{d^2x}{dt^2} + \sin\theta\, M\frac{d^2z}{dt^2}$:

$$-[(u_0 + u_2)\cos\theta + \Sigma\mu\rho\cos e]\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2} - [(u_0 + u_1)\cos\theta + \Sigma\mu\rho\cos e]\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

$$+[u'_0 + u_2)\sin\theta - \Sigma\mu\rho\sin e]\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2} - [(u'_0 + u_1)\sin\theta - \Sigma\mu\rho\sin e]\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

$$-k\cos\theta \cdot 2\cos\varphi\, \Sigma_1^\infty i A_i \sin 2i\alpha \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} - k\cos\theta \cdot 4\cos\varphi\, \Sigma_1^\infty i^2 A_i \cos 2i\alpha \cdot \frac{d\alpha^2}{dt^2};$$

Equation [z],

Somme des termes $+\cos\theta\,\mathrm{M}\dfrac{d^2z}{dt^2}-\sin\theta\,\mathrm{M}\dfrac{d^2x}{dt^2}$:

$$+[(u_0+u_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho\sin\epsilon]\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}+[(u_0+u_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho\sin\epsilon]\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+[(u'_0+u_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\cos\epsilon]\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}-[(u'_0+u_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\cos\epsilon]\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+k\sin\theta\,.\,2\cos\varphi\,\Sigma_i^{\infty}iA_i\sin 2i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}+k\sin\theta\,.\,4\cos\varphi\,\Sigma_i^{\infty}i^2A_i\cos 2i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2};$$

Equation (z),

Somme des termes $-\cos\theta\,\mathrm{My}\dfrac{d^2x}{dt^2}-\sin\theta\,\mathrm{My}\dfrac{d^2z}{dt^2}$:

$$+[(\nu_0+\nu_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\lambda\cos\epsilon]\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}+[(\nu_0+u_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\lambda\cos\epsilon]\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$-[(\nu'_0+\nu_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho\lambda\sin\epsilon]\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}+[(\nu'_0+\nu_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho)\sin\epsilon]\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+k\cos\theta\Lambda\,.\,2\cos\varphi\,\Sigma_i^{\infty}iA_i\sin 2i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}+k\cos\theta\Lambda\,.\,4\cos\varphi\,\Sigma_i^{\infty}i^2A_i\cos 2i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2};$$

Equation (x),

Somme des termes $+\cos\theta\,\mathrm{My}\dfrac{d^2z}{dt^2}-\sin\theta\,\mathrm{My}\dfrac{d^2x}{dt^2}$:

$$+[(\nu_0+\nu_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho\lambda\sin\epsilon]\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}+[(\nu_0+\nu_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho\lambda\sin\epsilon]\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+[(\nu'_0+\nu_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\lambda\cos\epsilon]\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}-[(\nu'_0+\nu_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\lambda\cos\epsilon]\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+k\sin\theta\Lambda\,.\,2\cos\varphi\,\Sigma_i^{\infty}iA_i\sin 2i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}+k\sin\theta\Lambda\,.\,4\cos\varphi\,\Sigma_i^{\infty}i^2A_i\cos 2i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2};$$

Equation (y),

Posons, pour abréger :

$$\left.\begin{aligned}
&S=M'r^2\frac{B'}{B}+\Sigma M'''C'''^2+\Sigma n'M'''I'''^2+\Sigma\mu\rho^2+\Sigma\mu\iota^2,\\
&\tfrac{1}{2}T_0\Sigma M=\cos(g'-\theta)(M''a+kA_0\cos\varphi)\\
&\qquad\qquad+\cos g'[M_fL_f+\Sigma M'''L'''+\Sigma M^{\nu}L^{\nu}+\Sigma\mu l]\\
&\qquad\qquad-\sin g'[M_fN_f+\Sigma M^{\nu}N^{\nu}],\\
&S'=M_fN_f+\Sigma M^{\nu}N^{\nu}-\sin\phi[M''a+kA_0\cos\varphi].
\end{aligned}\right\}\quad(49\ bis)$$

Les quantités S, T_0 et S′ seront des constantes, et l'on aura, en effectuant les développements nécessaires,

$$S^e \text{ d. ter.} + \left[g\cos(g'-\theta) - \sin\theta\frac{dv}{dt}\right]Mx - \left[g\sin(g'-\theta) - \cos\theta\frac{dv}{dt}\right]Mz:$$

$$+\frac{1}{2}g\Gamma_0\Sigma M \qquad +\frac{dv}{dt}S'$$

$$+g\cos g'[(u_0+u_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon]\cos\alpha - \frac{dv}{dt}[(u_0+u_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon]\cos\alpha$$

$$+g\sin g'[(u_0+u_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon]\cos\alpha$$

$$+g\cos g'[(u'_0+u_1)\sin\theta-\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon]\sin\alpha + \frac{dv}{dt}[u'_0+u_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon]\sin\alpha$$

$$-g\sin g'[(u'_0+u_1)\cos\theta+\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon]\sin\alpha$$

$$+g\cos(g'-\theta)k.\cos\varphi\,\Sigma_1^\infty A_i\cos 2i\alpha \qquad -\frac{dv}{dt}k\sin\theta.\cos\varphi\,\Sigma_1^\infty A_i\cos 2i\alpha.$$

Somme des termes $+M\left(z\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2z}{dt^2}\right)+MI^2\frac{d^2\gamma''}{dt^2}$:

$$-S\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

$$+(w_0-w_1\cos\theta-\Sigma\mu\rho l\cos\varepsilon)\cos\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2} - (w_0-w_1\cos\theta-\Sigma\mu\rho l\cos\varepsilon)\sin\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

$$-(w_1\sin\theta-\Sigma\mu\rho l\sin\varepsilon)\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2} \qquad -(w_1\sin\theta-\Sigma\mu\rho l\sin\varepsilon)\cos\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

$$+\frac{w_0}{B_0}\Sigma_1^\infty B_i\cos(2i+1)\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2} \qquad -\frac{w_0}{B_0}\Sigma_1^\infty(2i+1)B_i\sin(2i+1)\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}.$$

Règles pour déduire des résultats précédents les valeurs des Sommes dans les équations (26) et (27), étendues aux deux machines dont se compose la locomotive.

16. Pour déduire des valeurs précédentes celles qui se rapportent à la machine située du côté des y négatifs, il suffira d'y changer α en $\alpha+\frac{\pi}{2}$, (π désignant le rapport de la circonférence au diamètre), et d'y changer en même temps les signes des valeurs de y. Nous supposons que la manivelle située du côté des y négatifs soit en avant de celle que nous

avons considérée jusqu'ici, d'un angle droit compté dans le sens de α. Nous sommes en effet autorisés à la supposer en avant, puisque le côté des y positifs restant indéterminé, on pourra toujours le choisir en sorte que cette hypothèse soit réalisée. Quant aux facteurs $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ et $\frac{d\alpha^2}{dt^2}$, ils sont communs aux termes correspondants des deux machines, à cause de la liaison des manivelles.

C'est ici le lieu de rappeler que nous avons admis pour les roues motrices munies de contrepoids la possibilité de déroger à la loi de symétrie du n° 2. Pour distinguer les termes dépendants des contrepoids et qui sont relatifs à la machine située du côté des y négatifs, nous écrirons ρ_1 et e_1 à la place de ρ et e dans ces termes, en laissant le même μ pour deux contrepoids conjugués, à cause de la condition d'égalité des masses de ces organes, condition qui nous a permis de supprimer certains termes dans les équations générales.

Si nous nous reportons aux expressions des sommes dans le n° précédent, nous observerons que tous les coefficients binômes ou trinômes qui multiplient $\sin\alpha$ et $\cos\alpha$ peuvent être mis sous la forme

$$K \pm \Sigma,$$

en désignant par Σ la somme des termes en $\mu\rho$ (*); ce sont d'ailleurs les seuls termes qui dependent des contrepoids. Pour distinguer les termes de même forme qui se rapportent à

(*) Par exemple, si l'on considère le coefficient

$$(u_0 + u_1)\cos\theta + \Sigma\mu\rho\cos\varepsilon,$$

K représentera $(u_0 + u_1)\cos\theta$, et Σ représentera $\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon$; dans ce cas il faudra affecter Σ du signe +.

Autre exemple : considérons le coefficient

$$w_0 - w_1\cos\theta - \Sigma\mu\rho l\cos\varepsilon,$$

K désignera $w_0 - w_1\cos\theta$, et Σ tiendra lieu de $\Sigma\mu\rho l\cos\varepsilon$; mais alors on devra faire précéder Σ du signe —.

la machine située du côté des y négatifs, nous désignerons ces coefficients par

$$K \pm \Sigma_1,$$

K restant le même que dans l'expression précédente, et l'indice 1 rappelant que les lettres ρ et e. comprises sous les sommes Σ, devront être marquées par l'indice 1.

Occupons-nous, en premier lieu, des termes qui ne sont point affectés du facteur y, ou qui font partie des équations $[x]$, $[z]$ et (y).

1° Les termes non affectés de facteurs trigonométriques donneront lieu, pour la machine située du côté des y négatifs, à des termes égaux, en sorte que la somme des termes étendue aux deux machines s'obtiendra en doublant les termes de cette espèce qui se trouvent dans les expressions du n° 15.

2° Les termes de la forme $(K \pm \Sigma)\sin\alpha$ devront être changés en

$$(K \pm \Sigma)\sin\alpha + (K \pm \Sigma_1)\cos\alpha,$$

à cause de $\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = \cos\alpha$.

Les termes de la forme $(K \pm \Sigma)\cos\alpha$ donneront

$$(K \pm \Sigma)\cos\alpha - (K \pm \Sigma_1)\sin\alpha,$$

à cause de $\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = -\sin\alpha$.

3° Les termes en $\frac{\sin}{\cos} 2i\alpha$ (*) ont pour facteurs des constantes indépendantes de μ ou des contrepoids : ces facteurs restent donc les mêmes dans les deux machines. Il s'ensuit qu'en faisant abstraction de ces mêmes facteurs, il faudra changer

$$\sin 2i\alpha \quad \text{en} \quad \sin 2i\alpha + \sin 2i\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$\cos 2i\alpha \quad \text{en} \quad \cos 2i\alpha + \cos 2i\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right),$$

(*) Nous avertissons que le symbole $\frac{\sin}{\cos} 2i\alpha$ signifie $\sin 2i\alpha$ ou $\cos 2i\alpha$.

dans les expressions du n° 15, pour avoir les sommes étendues à la locomotive entière. Nous pourrions obtenir de diverses manières les valeurs simplifiées des fonctions trigonométriques que nous venons d'écrire; pour suivre une méthode uniforme, nous ferons usage des formules qui servent à convertir les sommes de sinus et de cosinus en produits. Ces formules donnent

$$\sin 2i\alpha + \sin 2i\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right) = 2\cos i\frac{\pi}{2}\sin\left(2i\alpha + i\frac{\pi}{2}\right)$$

$$= 2\cos i\frac{\pi}{2}\left(\sin 2i\alpha\cos i\frac{\pi}{2} + \cos 2i\alpha\sin i\frac{\pi}{2}\right)$$

$$= 2\cos^2 i\frac{\pi}{2}\sin 2i\alpha + \sin i\pi\cos 2i\alpha.$$

Mais on a $\sin i\pi = 0$. La somme des cosinus étant effectuée de la même manière, il viendra

$$\sin 2i\alpha + \sin 2i\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right) = 2\cos^2 i\frac{\pi}{2}\sin 2i\alpha,$$

$$\cos 2i\alpha + \cos 2i\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right) = 2\cos^2 i\frac{\pi}{2}\cos 2i\alpha.$$

Or $\cos^2 i\frac{\pi}{2}$ est nul pour i impair, et égal à $+1$ pour i pair. Afin de n'avoir point à faire cette distinction dans les sommes Σ qui portent sur les fonctions $\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix} 2i\alpha$, on voit qu'il suffit d'y changer i en $2i$, en conservant la limite inférieure des indices i égale à l'unité. De cette manière on a

$$\Sigma_1^\infty A_i\cos 2i\alpha + \Sigma_1^\infty A_i\cos 2i\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right) = 2\Sigma_1^\infty A_{2i}\cos 4i\alpha,$$

$$\Sigma_1^\infty iA_i\sin 2i\alpha + \Sigma_1^\infty iA_i\sin 2i\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right) = 2\Sigma_1^\infty 2iA_{2i}\sin 4i\alpha,$$

$$\Sigma_1^\infty i^2A_i\cos 2i\alpha + \Sigma_1^\infty i^2A_i\cos 2i\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right) = 2\Sigma_1^\infty (2i)^2A_{2i}\cos 4i\alpha.$$

4° Les termes en $(2i+1)\alpha$ donneront

$$\sin(2i+1)\alpha + \sin(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right) = 2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}\sin(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right),$$

$$\cos(2i+1)\alpha + \cos(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right) = 2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}\cos(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right).$$

Le développement du facteur indépendant de α est

$$2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}=2\left(\cos i\frac{\pi}{2}\cos\frac{\pi}{4}-\sin i\frac{\pi}{2}\sin\frac{\pi}{4}\right)=\sqrt{2}\left(\cos i\frac{\pi}{2}-\sin i\frac{\pi}{2}\right).$$

Cette formule donne :

pour i pair, $2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}=(-1)^{\frac{i}{2}}\sqrt{2}$,

pour i impair, $2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}=-(-1)^{\frac{i-1}{2}}\sqrt{2}=(-1)^{\frac{i+1}{2}}\sqrt{2}$.

Il en résulte la série de valeurs suivantes :

i	1	2	3	4	5	6	7	8	.....
$2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}$	$-\sqrt{2}$	$-\sqrt{2}$	$+\sqrt{2}$	$+\sqrt{2}$	$-\sqrt{2}$	$-\sqrt{2}$	$+\sqrt{2}$	$+\sqrt{2}$	.....

En conservant la valeur algébrique de cette quantité, on aura

$$\Sigma_i^{\infty}B_i\cos(2i+1)\alpha+\Sigma_i^{\infty}B_i\cos(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right)=$$

$$=\Sigma_i^{\infty}2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}B_i\cos(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right),$$

$$\Sigma_i^{\infty}(2i+1)B_i\sin(2i+1)\alpha+\Sigma_i^{\infty}(2i+1)B_i\sin(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{2}\right)=$$

$$=\Sigma_i^{\infty}2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}(2i+1)B_i\sin(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right).$$

Passons maintenant aux termes affectés du facteur y, ou qui font partie des équations (z) et (x). (Voir le tableau du n° 15.) Nous avons dit que pour avoir les termes relatifs à la machine située du côté des y négatifs, il fallait non seulement changer α en $\alpha+\frac{\pi}{2}$, mais, en outre, changer les signes des valeurs de y.

1° Il résulte de ce qui précède que, s'il y avait des termes indépendants de facteurs trigonométriques, ces termes devraient être annulés dans les sommes relatives à la locomotive

entière. Mais les équations (z) et (a) ne contiennent pas de pareils termes.

2° Les termes de la forme $(K \pm \Sigma)\sin\alpha$ donneront pour la machine située du côté des y négatifs, des termes de la forme $-(K \pm \Sigma_1)\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)$; ceux de la forme $(K \pm \Sigma)\cos\alpha$ donneront pareillement $-(K \pm \Sigma_1)\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)$; en sorte que, pour avoir les sommes de ces termes étendues à la locomotive entière, il faudra, à la place de $(K \pm \Sigma)\sin\alpha$, écrire

$$(K \pm \Sigma)\sin\alpha - (K \pm \Sigma_1)\cos\alpha,$$

et changer $(K \pm \Sigma)\cos\alpha$ en

$$(K \pm \Sigma)\cos\alpha + (K \pm \Sigma_1)\sin\alpha.$$

3° Les termes en $\begin{matrix}\sin \\ \cos\end{matrix} 2i\alpha$, ainsi que nous l'avons dit plus haut, ont pour facteurs constants des quantités communes aux deux machines; en faisant abstraction de ces facteurs, il faudra donc, pour avoir les sommes étendues à la locomotive entière, changer, dans les expressions du n° 15,

$$\sin 2i\alpha \quad \text{en} \quad \sin 2i\alpha - \sin 2i\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$\cos 2i\alpha \quad \text{en} \quad \cos 2i\alpha - \cos 2i\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right).$$

En procédant comme ci-dessus, il viendra

$$\sin 2i\alpha - \sin 2i\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = 2\sin^2 i\frac{\pi}{2}\sin 2i\alpha,$$

$$\cos 2i\alpha - \cos 2i\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = 2\sin^2 i\frac{\pi}{2}\cos 2i\alpha.$$

Ces deux derniers résultats sont nuls pour i pair, et se réduisent respectivement à $2\sin 2i\alpha$ et $2\cos 2i\alpha$ pour toutes les valeurs impaires de i. Afin de n'avoir égard qu'aux valeurs impaires de i dans les sommes Σ qui portent sur les fonctions $\begin{matrix}\sin \\ \cos\end{matrix} 2i\alpha$, nous changerons i en $2i+1$; mais comme ces sommes s'étendent depuis $i=1$ jusqu'à $i=\infty$, nous devrons, pour

comprendre les termes qui répondent à $i = 1$, substituer la limite $i = 0$ à la limite $i = 1$. Il viendra de cette manière

$$\Sigma_1^\infty iA_i \sin 2i\alpha - \Sigma_1^\infty iA_i \sin 2i\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = 2\Sigma_0^\infty (2i+1) A_{2i+1} \sin(4i+2)\alpha,$$

$$\Sigma_1^\infty i^2 A_i \cos 2i\alpha - \Sigma_1^\infty i^2 A_i \cos 2i\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = 2\Sigma_0^\infty (2i+1)^2 A_{2i+1} \cos(4i+2)\alpha.$$

Les différents résultats qui viennent d'être obtenus doivent maintenant être rapprochés, afin de faciliter la formation des équations du problème. Voici donc, sous forme de tableau, l'indication des substitutions à effectuer dans les expressions des sommes données au n° 15, lesquelles se rapportent à la machine située du côté des y positifs, pour obtenir la valeur de ces mêmes sommes étendues aux deux machines dont se compose une locomotive.

Au lieu des facteurs	Substituer dans les Sommes inscrites au n° 15 et provenant des	
	Equations $[x]$, $[z]$ et (y),	Equations (z) et (x),
1	2	»
de la forme $(K \pm \Sigma)\sin\alpha$	$(K \pm \Sigma)\sin\alpha + (K \pm \Sigma_1)\cos\alpha$	$(K \pm \Sigma)\sin\alpha - (K \pm \Sigma_1)\cos\alpha$
de la forme $(K \pm \Sigma)\cos\alpha$	$(K \pm \Sigma)\cos\alpha - (K \pm \Sigma_1)\sin\alpha$	$(K \pm \Sigma)\cos\alpha + (K \pm \Sigma_1)\sin\alpha$
$\Sigma_1^\infty A_i \cos 2i\alpha$	$2\Sigma_1^\infty A_{2i} \cos 4i\alpha$	»
$\Sigma_1^\infty iA_i \sin 2i\alpha$	$2\Sigma_1^\infty iA_{2i} \sin 4i\alpha$	$2\Sigma_0^\infty (2i+1) A_{2i+1} \sin(4i+2)\alpha$
$\Sigma_1^\infty i^2 A_i \cos 2i\alpha$	$2\Sigma_1^\infty (2i)^2 A_{2i} \cos 4i\alpha$	$2\Sigma_0^\infty (2i+1)^2 A_{2i+1} \cos(4i+2)\alpha$
$\Sigma_1^\infty B_i \cos(2i+1)\alpha$	$\Sigma_1^\infty 2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4} B_i \cos(2i+1)\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)$	»
$\Sigma_1^\infty (2i+1) B_i \sin(2i+1)\alpha$	$\Sigma_1^\infty 2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4} (2i+1) B_i \sin(2i+1)\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)$	» (*)

(10)

(*) La comparaison des deux dernières colonnes de ce tableau avec la première montre que la combinaison des deux machines ne change pas l'ordre

En opérant dans les expressions du n° 15 toutes les substitutions indiquées par le précédent tableau, on pourra former avec la plus grande facilité les seconds membres des équations (26) et (27). Seulement, pour simplifier l'écriture, nous poserons :

$$\left.\begin{aligned} U=u_0+u_1, \quad U'=u'_0+u_1, \\ V=v_0+v_1, \quad V'=v'_0+v_1. \end{aligned}\right\} \quad (51)$$

Il nous reste à recueillir les éléments constitutifs des premiers membres de nos équations (26) et (27).

FORCES EXTÉRIEURES DIFFÉRENTES DE LA PESANTEUR, ET COORDONNÉES DE LEURS POINTS D'APPLICATION.

17. Nous négligerons, dans les équations (26) et (27), la différence des pressions atmosphériques qui s'exercent sur la colonne ascendante de vapeur et de fumée d'une part, et la partie extérieure de la boîte à fumée qui répond à la projection de la section droite de la cheminée sur le plan des xy de l'autre. Nous traiterons de même la différence de pression atmosphérique sur l'ouverture libre de la grille et sa projection sur la partie supérieure de la boîte à feu. Enfin nous négligerons pareillement la différence des pressions atmosphériques sur les faces latérales de la locomotive; mais nous aurons égard à la composante de la résistance de l'air parallèle à la voie.

X, Y, Z, désignant généralement les composantes des forces

---

de grandeur des termes principaux dans une machine isolée; les termes principaux répondent au facteur 1 ou aux facteurs en $\sin\alpha$ ou $\cos\alpha$ dans la première colonne.

Les termes du deuxième ordre qui répondent à $i=1$ (voir n° 13) dans A_i se changent en termes du quatrième ordre dans les équations $[x]$, $[z]$ et (y), avec cette circonstance que leur période est réduite à moitié. Les termes du deuxième ordre en B_i, et qui proviennent de la bielle, y conservent leur ordre et leur période; seulement cette période n'est que les deux tiers de la période des termes en A_i.

Les termes du deuxième ordre en A_i conservent cet ordre et leur période dans les équations (z) et (x).

extérieures différentes de la pesanteur, et x', y', z', les coordonnées de leurs points d'application, soient :

— Q la composante de la réaction exercée par le convoi, parallèlement à l'axe des x ou à la voie ;

— Q′ la composante de la résistance de l'air parallèle au même axe ;

F la somme des composantes, suivant l'axe des x, des réactions des rails exercées sur les roues qui sont situées du côté des y positifs ;

F_1 la même somme pour le côté des y négatifs ;

G la somme des composantes, suivant l'axe des y, des réactions exercées par les rails sur les deux roues dont l'axe de l'essieu a pour abscisse l mesurée parallèlement à la voie ;

G′, G″, les mêmes sommes de composantes pour les paires de roues dont les axes ont l' et l'' pour abscisses ;

— H la composante, suivant l'axe des z, de la réaction exercée sur la roue située du côté des y positifs, dont l'abscisse est l ;

— H_1 la même composante pour la roue opposée ;

— H′, — H_1' ; — H″, — H_1'', les mêmes composantes relativement aux deux autres paires de roues ;

E la demi-largeur de la voie ;

R le rayon des roues motrices.

Nous aurons le tableau suivant des composantes et des coordonnées de leurs points d'application :

X	y'	z'	Y	z'	x'	Z	x'	y'
+F	+E	+R	+G	+R	$+l$	—H	$+l$	+E
$+F_1$	—E	+R	+G′	+R	$+l'$	$-H_1$	$+l$	—E
—Q	o	$+q$	+G″	+R	$+l''$	—H′	$+l'$	+E
—Q′	o	$+q'$				$-H_1'$	$+l'$	—E
						—H″	$+l''$	+E
						$-H_1''$	$+l''$	—E

ÉQUATIONS DÉVELOPPÉES DES MOUVEMENTS DE TRANSLATION ET DE ROTATION (26) ET (27).

18. Le tableau qui termine le numéro précédent nous fournit tout ce qui est nécessaire pour la formation des premiers membres des équations (26) et (27). Quant aux seconds membres, nous aurons à opérer dans les expressions des sommes présentées au n° 15, les substitutions indiquées dans le tableau (50), en ayant égard en outre aux valeurs (51).

En nous reportant aux équations (26) et (27) et ayant le soin de passer dans les seconds membres les composantes ou moments qui ne se rapportent pas aux réactions exercées par les rails, nous aurons les équations suivantes, dans lesquelles tous les termes affectés de $\sin\alpha$ ou $\cos\alpha$ se trouvent réunis en un seul, et le facteur λ, qui est commun aux termes embrassés par les sommes Σ, est mis en dehors du signe Σ.

Équation [x],

$$\begin{aligned}
F+F_1 = Q+Q'+\left(\frac{dv}{dt}-g\sin\varepsilon'\right)\Sigma M \\
-\left\{\begin{array}{l}+[U\cos\theta+U'\sin\theta+\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon-\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1]\sin\alpha\\ +[U\cos\theta-U'\sin\theta+\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon+\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1]\cos\alpha\end{array}\right\}\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\
-\left\{\begin{array}{l}+[U\cos\theta+U'\sin\theta+\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon-\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1]\cos\alpha\\ -[U\cos\theta-U'\sin\theta+\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon+\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1]\sin\alpha\end{array}\right\}\frac{d\alpha^2}{dt^2} \\
-k\cos\theta.4\cos\varphi\Sigma_1^\infty 2iA_{2i}\sin 4i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\
-k\cos\theta.8\cos\varphi\Sigma_1^\infty(2i)^2A_{2i}\cos 4i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}.
\end{aligned}$$

Équation [y],

$$G+G'+G''=0.$$

Équation [z],

$$-[H+H'+H''+H_1+H'_1+H''_1]=-g\cos g'\Sigma M$$
$$+\begin{cases}+[U\sin\theta-U'\cos\theta-\Sigma\mu\rho\sin e-\Sigma\mu\rho_1\cos e_1]\sin\alpha\\+[U\sin\theta+U'\cos\theta+\Sigma\mu\rho\cos e-\Sigma\mu\rho_1\sin e_1]\cos\alpha\end{cases}\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+\begin{cases}+[U\sin\theta-U'\cos\theta-\Sigma\mu\rho\sin e-\Sigma\mu\rho_1\cos e_1]\cos\alpha\\-[U\sin\theta+U'\cos\theta+\Sigma\mu\rho\cos e-\Sigma\mu\rho_1\sin e_1]\sin\alpha\end{cases}\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+k\sin\theta.4\cos\varphi\Sigma_1^\infty 2i A_{2i}\sin 4i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+k\sin\theta.8\cos\varphi\Sigma_1^\infty(2i)^2A_{2i}\cos 4i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}.$$

Équation (z),

$$Gl+G'l'+G''l''-(F-F_1)E=$$
$$+\begin{cases}+[V\cos\theta-V'\sin\theta+\lambda\Sigma\mu\rho\cos e+\lambda\Sigma\mu\rho_1\sin e_1]\sin\alpha\\-[V\cos\theta+V'\sin\theta-\lambda\Sigma\mu\rho\sin e+\lambda\Sigma\mu\rho_1\cos e_1]\cos\alpha\end{cases}\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+\begin{cases}+[V\cos\theta-V'\sin\theta+\lambda\Sigma\mu\rho\cos e+\lambda\Sigma\mu\rho_1\sin e_1]\cos\alpha\\+[V\cos\theta+V'\sin\theta-\lambda\Sigma\mu\rho\sin e+\lambda\Sigma\mu\rho_1\cos e_1]\sin\alpha\end{cases}\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+k\cos\theta A.4\cos\varphi\Sigma_0^\infty(2i+1)A_{2i+1}\sin(4i+2)\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+k\cos\theta A.8\cos\varphi\Sigma_0^\infty(2i+1)^2A_{2i+1}\cos(4i+2)\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}.$$

Équation (æ),

$$[H_1+H'_1+H''_1-(H+H'+H'')]E-(G+G'+G'')R=$$
$$+\begin{cases}+[V\sin\theta+V'\cos\theta-\lambda\Sigma\mu\rho\sin e+\lambda\Sigma\mu\rho_1\cos e_1]\sin\alpha\\-[V\sin\theta-V'\cos\theta-\lambda\Sigma\mu\rho\cos e-\lambda\Sigma\mu\rho_1\sin e_1]\cos\alpha\end{cases}\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+\begin{cases}+[V\sin\theta+V'\cos\theta-\lambda\Sigma\mu\rho\sin e+\lambda\Sigma\mu\rho_1\cos e_1]\cos\alpha\\+[V\sin\theta-V'\cos\theta-\lambda\Sigma\mu\rho\cos e-\lambda\Sigma\mu\rho_1\sin e_1]\sin\alpha\end{cases}\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+k\sin\theta A.4\cos\varphi\Sigma_0^\infty(2i+1)A_{2i+1}\sin(4i+2)\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+k\sin\theta A.8\cos\varphi\Sigma_0^\infty(2i+1)^2A_{2i+1}\cos(4i+2)\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}.$$

Équation (y),

$$(F+F_1)R+(H+H_1)l+(H'+H'_1)l'+(H''+H''_1)l''=$$
$$Qq+Q'q'+g\Gamma_0\Sigma M+2S'\frac{dv}{dt}-2S\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$-\left\{\begin{array}{r} g\cos g'[U\cos\theta-U'\sin\theta+\Sigma\mu\rho\sin e+\Sigma\mu\rho_1\cos e_1] \\ +\left(g\sin g'-\frac{dv}{dt}\right)[U\sin\theta+U'\cos\theta+\Sigma\mu\rho\cos e-\Sigma\mu\rho_1\sin e_1] \end{array}\right\}\sin\alpha$$
$$+\left\{\begin{array}{r} g\cos g'[U\cos\theta+U'\sin\theta+\Sigma\mu\rho\cos e-\Sigma\mu\rho_1\sin e_1] \\ +\left(g\sin g'-\frac{dv}{dt}\right)[U\sin\theta-U'\cos\theta-\Sigma\mu\rho\sin e-\Sigma\mu\rho_1\cos e_1] \end{array}\right\}\cos\alpha$$
$$+\left[g\cos(g'-\theta)-\frac{dv}{dt}\sin\theta\right]k.2\cos\varphi\Sigma_1^\infty A_{2i}\cos 4i\alpha$$
$$-\left\{\begin{array}{l} +[\omega_0-\omega_1\cos\theta+\omega_1\sin\theta-\Sigma\mu\rho l\sin e-\Sigma\mu\rho_1 l\cos e_1]\sin\alpha \\ -[\omega_0-\omega_1\cos\theta-\omega_1\sin\theta-\Sigma\mu\rho l\cos e+\Sigma\mu\rho_1 l\sin e_1]\cos\alpha \end{array}\right\}\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$-\left\{\begin{array}{l} +[\omega_0-\omega_1\cos\theta+\omega_1\sin\theta-\Sigma\mu\rho l\sin e-\Sigma\mu\rho_1 l\cos e_1]\cos\alpha \\ +[\omega_0-\omega_1\cos\theta-\omega_1\sin\theta-\Sigma\mu\rho l\cos e+\Sigma\mu\rho_1 l\sin e_1]\sin\alpha \end{array}\right\}\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+\frac{\omega_0}{B_0}\Sigma_1^\infty 2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}B_i\cos(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right).\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$-\frac{\omega_0}{B_0}\Sigma_1^\infty 2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}(2i+1)B_i\sin(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right).\frac{d\alpha^2}{dt^2}.$$

FORMATION DES ÉQUATIONS DE CONDITION RELATIVES A LA STABILITÉ, ET TRANSFORMATION DES PRÉCÉDENTES ÉQUATIONS.

19. Nous allons mener de front deux opérations distinctes quant au but : comme elles se rattachent à la même analyse, on nous permettra de les confondre un instant ; nous éviterons de cette manière de reproduire certains calculs algébriques.

En faisant l'application des six équations du n° 18 à une locomotive munie ou non de contrepoids, on obtiendrait à chaque instant les sommes des projections des réactions exercées par les rails suivant les axes x, y, z, et les moments de ces composantes par rapport aux mêmes axes. Ces quantités seraient données en fonctions de la résistance Q opposée par le train, de la résistance de l'air Q′, puis de l'angle α de la ma-

nivelle avec l'axe du piston, du carré de la vitesse angulaire, et de l'accroissement de cette vitesse par unité de temps. (La quantité $\frac{dv}{dt}$ est elle-même proportionnelle à cet accroissement en vertu de l'équation (8), lorsqu'il ne se produit pas de glissement longitudinal des roues motrices.) La variation de vitesse doit être censée donnée par des instruments appropriés à ce genre de mesure, autrement il faudrait la tirer de l'équation (22) développée, en fonction de la vitesse, et au moyen de la loi supposée fournie par d'autres instruments, suivant laquelle la pression de la vapeur agit sur les pistons dans chaque position des manivelles. Nous reprendrons la discussion de nos équations après que nous leur aurons donné une forme plus commode pour les calculs numériques.

Le but essentiel de notre travail consiste, d'autre part, à tirer de ces équations les conditions que doivent remplir les masses mobiles pour réaliser la plus grande stabilité possible.

Nous avons établi (n° 5) que les conditions relatives à l'invariabilité des réactions exercées par les rails, en ce qui concerne la constitution de la locomotive elle-même, se réduisent, lorsque l'on fait abstraction de l'élasticité, à l'invariabilité des sommes de leurs composantes et de leurs moments. En observant que ces quantités sont, pour des valeurs données de Q et Q', fonctions des seules variables α, $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ ou $\frac{1}{R}\frac{dv}{dt}$, et $\frac{d\alpha^2}{dt^2}$, on est conduit à égaler à zéro, dans les seconds membres des équations du numéro précédent, la somme des coefficients des termes de même espèce (*) qui contiennent ces variables. Les

(*) Nous désignons par termes de même espèce ceux qui sont affectés des mêmes facteurs variables. Ainsi les termes en $\frac{d^2x}{dt^2}$ ou $\frac{dx^2}{dt^2}$ qui comprennent un coefficient de la forme

$$A\sin x + B\cos x$$

équivalent en réalité à deux termes distincts; si l'on pose en effet

$$A\sin\alpha + B\cos\alpha = 0,$$

dans le but d'annuler un terme en $\frac{d^2x}{dt^2}$ ou $\frac{dx^2}{dt^2}$ pour toute valeur de l'angle α,

relations que l'on obtiendra ainsi serviront à déterminer certaines quantités, masses ou dimensions, qui ne seront pas fixées d'une manière absolue par des conditions d'une autre nature. Nous pourrons nous assurer si ces relations n'indiquent aucune incompatibilité ou impossibilité, en observant toutefois que les termes affectés de $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ ont moins d'importance. En effet, la bonne distribution de la vapeur, d'une part; d'autre part, la grandeur des masses de la locomotive et du train, ont pour résultat, lorsque les ressorts de traction sont convenablement bandés, de rendre très petite la plus grande valeur de $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$, aussitôt que l'on a atteint la vitesse périodiquement uniforme que doit garder le convoi.

Nous allons du même coup écrire les notations abrégées par lesquelles nous remplacerons les coefficients des termes de même espèce pour faciliter le calcul numérique des équations du n° 18 dans les machines non équilibrées ou imparfaitement équilibrées, et les équations de condition qui résultent de ce que ces mêmes coefficients doivent être égalés à zéro. Toutefois, nous donnerons préalablement quelques explications.

Il se présente des conditions impossibles que nous ne ferons pas figurer dans le tableau suivant. Par exemple, l'équation [x], n° 18, nous présente le terme variable $\frac{dv}{dt}\Sigma M$, dont nous ne pouvons pas égaler à zéro le coefficient ΣM. L'équation (y) nous offre deux termes indépendants de α que l'on pourrait réunir en un seul en vertu de l'équation (8); on aurait ainsi la condition

$$RS' - S = 0, \qquad (52)$$

---

il faut écrire séparément

$$A = 0, \qquad B = 0.$$

Ceci se prouve très aisément comme il suit : La fonction donnée, devant être nulle pour toute valeur de α, doit être nulle pour $\sin\alpha = 0$; dans cette hypothèse, il vient $\pm B = 0$. Pareillement elle doit s'annuler pour $\cos\alpha = 0$; on a par suite $\pm A = 0$: donc la condition proposée conduit aux deux conditions distinctes $A = 0$, $B = 0$.

sur laquelle nous reviendrons plus loin. Nous laisserons de côté ces termes pour l'instant. Disons seulement qu'ils auront un effet d'autant moins sensible que l'on sera parvenu à rendre plus petites les valeurs extrêmes de $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ dans le cas du mouvement périodiquement uniforme ; et aussi que les valeurs de cette quantité, nécessairement sensibles lorsque l'on veut augmenter ou diminuer la vitesse moyenne, ne produiraient aucun effet nuisible relativement à l'usé local des bandages, si l'on parvenait, au moyen d'une distribution convenable de la vapeur, à rendre $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ indépendant de l'angle α, et dépendant seulement de la manœuvre du conducteur de la machine pour faire varier la vitesse.

Le tableau suivant présente, en regard des équations de condition, l'indication des équations qui les fournissent, l'ordre (*) de grandeur des termes qu'elles sont destinées à faire disparaître, et les coefficients de ces termes qui ne sont pas des sinus ou cosinus de l'angle α ou de ses multiples.

En jetant un coup d'œil sur les équations de condition que présente le même tableau, on remarquera immédiatement que ces équations sont indépendantes explicitement de l'inclinaison g' de la voie à l'horizon ; ajoutons qu'elles en sont absolument indépendantes : c'est ce dont on s'assurera en remontant aux expressions (48) et (51) des quantités U, V, etc... Il s'ensuit que les conséquences auxquelles conduira la discussion des équations de condition auront lieu quelle que soit la pente de la voie. On pouvait prévoir aisément ce résultat.

(*) Nous devons rappeler (voir n° 13) que les coefficients A, B, sont de l'ordre $2i$ lorsque $\tang\varphi$ est supposé être du premier ordre par rapport à l'unité. Nos désignations ne doivent être considérées que comme s'étendant au premier des termes en A_i ou B_i compris sous les sommes Σ. Les termes indépendants des coefficients A_i, B_i autres que A_o et B_o seront considérés comme étant des termes principaux, dont la grandeur relative sera dans quelques cas l'objet d'une discussion spéciale.

Notations	Equations de condition	Equation	Facteurs	Ordre
(53)	$C\cos\Phi = U\cos\theta + U'\sin\theta + \Sigma\mu\rho\cos\varepsilon - \Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1 = 0,$	$[x]$	$\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{dz^2}{dt^2}$	»
		(y)	$g\cos g'$	»
	$C\sin\Phi = U\cos\theta - U'\sin\theta + \Sigma\mu\rho\sin\varepsilon + \Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1 = 0,$	$[x]$	$\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{dz^2}{dt^2}$	»
		(y)	$g\cos g'$	»
	$C'\cos\Phi' = U\sin\theta - U'\cos\theta - \Sigma\mu\rho\sin\varepsilon - \Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1 = 0,$	$[z]$	$\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{dz^2}{dt^2}$	»
		(y)	$g\sin g' - \frac{dv}{dt}$	»
	$C'\sin\Phi' = U\sin\theta + U'\cos\theta + \Sigma\mu\rho\cos\varepsilon - \Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1 = 0;$	$[z]$	$\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{dz^2}{dt^2}$	»
		(y)	$g\sin g' - \frac{dv}{dt}$	»
	$D\sin\Psi = V\cos\theta - V'\sin\theta + \lambda\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon + \lambda\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1 = 0,$	(z)	$\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{dz^2}{dt^2}$	»
	$D\cos\Psi = V\cos\theta + V'\sin\theta - \lambda\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon + \lambda\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1 = 0,$	(z)	id. id.	»
	$D'\sin\Psi' = V\sin\theta + V'\cos\theta - \lambda\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon + \lambda\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1 = 0,$	(x)	id. id.	»
	$D'\cos\Psi' = V\sin\theta - V'\cos\theta - \lambda\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon - \lambda\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1 = 0;$	(x)	id. id.	»
(54)	$J\sin\sigma = \omega_0 - \omega_1\cos\theta + \omega_2\sin\theta - \Sigma\mu\rho l\sin\varepsilon - \Sigma\mu\rho_1 l\cos\varepsilon_1 = 0,$	(y)	id. id.	»
	$J\cos\sigma = \omega_0 - \omega_1\cos\theta - \omega_2\sin\theta - \Sigma\mu\rho l\cos\varepsilon + \Sigma\mu\rho_1 l\sin\varepsilon_1 = 0;$	(y)	id. id.	
(55)	$k = 0,$	$[x]$	id. id.	4
		$[z]$	id. id.	4
		(z)	id. id.	2
		(x)	id. id.	2
		(y)	$g\cos(g' - \theta) - \frac{dv}{dt}\sin\theta$	4
(56)	$\omega_0 = 0.$	(y)	$\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{dz^2}{dt^2}$	2

20. Avant de nous occuper de la discussion des équations de condition, nous allons transformer les équations du n° 18, en faisant usage des quantités $C\cos\Phi$, $C\sin\Phi$, etc. L'état de la locomotive étant supposé connu, ces dernières quantités se calculeront aisément par leurs expressions ci-dessus : en les divisant deux à deux on obtiendra les tangentes des angles Φ, etc., et par suite ces angles eux-mêmes, qui resteront ambigus; mais cela sera sans inconvénient, puisque les coefficients C, etc., que l'on obtiendra en divisant par $\cos\Phi$ ou $\sin\Phi$, prendront les signes qui conviennent à la valeur admise de l'angle Φ.

Voici la forme que ces auxiliaires permettent de donner aux équations du n° 18.

(On a supprimé dans l'équation (x) le terme du premier membre, qui s'annule en vertu de l'équation $[y]$).

Equation $[x]$,

$$\left.\begin{aligned} F+F_1 = Q+Q'+\left(\frac{dv}{dt}-g\sin g'\right)\Sigma M \\ -C\sin(\alpha+\Phi)\frac{d^2\alpha}{dt^2}-C\cos(\alpha+\Phi)\frac{d\alpha^2}{dt^2} \\ -k\cos\theta.4\cos\varphi\Sigma_1^\infty 2iA_{2i}\sin 4i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\ -k\cos\theta.8\cos\varphi\Sigma_1^\infty(2i)^2A_{2i}\cos 4i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2} \end{aligned}\right\}$$

Equation $[y]$,

$$G+G'+G''=0. \qquad (57)$$

Equation $[z]$,

$$\left.\begin{aligned} -(H+H'+H''+H_1+H'_1+H''_1) = -g\cos g'\Sigma M \\ +C'\sin(\alpha+\Phi')\frac{d^2\alpha}{dt^2}+C'\cos(\alpha+\Phi')\frac{d\alpha^2}{dt^2} \\ +k\sin\theta.4\cos\varphi\Sigma_1^\infty 2iA_{2i}\sin 4i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\ +k\sin\theta.8\cos\varphi\Sigma_1^\infty(2i)^2A_{2i}\cos 4i\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}. \end{aligned}\right\}$$

Equation (z),

$$Gl+G'l'+G''l''-(F-F_1)E=-D\cos(\alpha+\Psi)\frac{d^2\alpha}{dt^2}+D\sin(\alpha+\Psi)\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+k\cos\theta A.4\cos\varphi\Sigma_0^{\infty}(2i+1)A_{2i+1}\sin(4i+2)\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+k\cos\theta A.8\cos\varphi\Sigma_0^{\infty}(2i+1)^2A_{2i+1}\cos(4i+2)\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

Equation (x),

$$[H_1+H'_1+H''_1-(H+H'+H'')]E=-D'\cos(\alpha+\Psi')\frac{d^2\alpha}{dt^2}+D'\sin(\alpha+\Psi')\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+k\sin\theta A.4\cos\varphi\Sigma_0^{\infty}(2i+1)A_{2i+1}\sin(4i+2)\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+k\sin\theta A.8\cos\varphi\Sigma_0^{\infty}(2i+1)^2A_{2i+1}\cos(4i+2)\alpha.\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

Equation (y),

$$(F+F_1)R+(H+H_1)l+(H'+H'_1)l'+(H''+H''_1)l''=$$
$$Qq+Q'q'+g\Gamma\Sigma M+2S'\frac{d\nu}{dt}-2S\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+g\cos g'C\cos(\alpha+\Phi)+\left(g\sin g'-\frac{d\nu}{dt}\right)C'\cos(\alpha+\Psi')$$
$$+\left[g\cos(g'-\theta)-\frac{d\nu}{dt}\sin\theta\right]k.2\cos\varphi\Sigma_1^{\infty}A_{2i}\cos4i\alpha$$
$$+J\cos(\alpha+\tau)\frac{d^2\alpha}{dt^2}-J\sin(\alpha+\sigma)\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+\frac{\omega_0}{B_0}\Sigma_1^{\infty}2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}B_i\cos(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right).\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$-\frac{\omega_0}{B_0}\Sigma_1^{\infty}2\cos(2i+1)\frac{\pi}{4}(2i+1)B_i\sin(2i+1)\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right).\frac{d\alpha^2}{dt^2}.$$

Ces expressions sont rigoureusement exactes; mais dans la pratique on pourra les réduire considérablement en conservant une suffisante exactitude.

En faisant complétement abstraction des termes en k dans les équations $[x]$, $[z]$ et (y), on ne négligera que des termes du 4e ordre. (Si l'on se reporte à la note du n° 13, on y verra

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

(Avril, Mai et Juin 1851)

N° 13

Pendant ce trimestre, la Société a traité les questions suivantes :

1° Théorie de l'équilibre des machines locomotives en mouvement (V. le résumé des séances, p. 57 à 67 et 105 à 106) ;

2° Aérage des mines (V. le résumé des séances, p. 67) ;

3° Discussion sur la construction des ponts suspendus (V. le résumé des séances, p. 74, 75, 77 à 82 et 129 à 138) ;

4° Drainage (V. le résumé des séances, p. 76) ;

5° Communication sur l'Exposition universelle de Londres (V. le résumé des séances, p. 85 à 92, 107 à 114) ;

6° Electro-magnétisme appliqué aux machines locomotives (V. le résumé des séances, p. 97 à 102 et 121 à 124) ;

7° Communication sur le forage d'un puits à la houillère de Schœneck-Stiring, près Forbach (Moselle) (V. le résumé des séances, p. 92) ;

8° Fondations naturelles et artificielles (V. le résumé des séances, p. 139) ;

9° Mesure de la puissance des moteurs à vapeur (V. le résumé des séances, p. 124) ;

10° Cristallisation du zinc (V. le résumé des séances, p. 106);

11° Etablissement des chemins de fer en Suisse (V. le résumé des séances, p. 115);

Pendant ce trimestre, la Société a reçu :

De M. Goschler, une note sur le forage d'un puits exécuté par M. Kind à la houillère de Schœneck-Stiring, près Forbach (Moselle).

De M. Blacher,

1° Le plan général du chemin de fer d'Amiens à Londres par Boulogne;

2° Le nivellement de ce chemin dans la vallée de la Somme;

3° Le plan général d'Amiens à Boulogne.

De M. Salvetat, une note lue à l'Acadamie des sciences le 25 novembre 1850, et ayant pour titre : *Recherches sur la composition des matières employées dans la fabrication et la décoration de la porcelaine en Chine*, par MM. Ebelmen et Salvetat.

De M. Cadiat, une notice sur l'emploi de la tôle, du fer forgé et de la fonte dans les ponts.

De M. Piquet, un mémoire sur la construction des fours à cémenter.

De M. Huet, une note sur la cristallisation du zinc.

De M. Love, une note relative à l'application de l'électro-magnétisme aux machines locomotives.

De M. Sautter, une note sur l'établissement des chemins de fer en Suisse.

De M. Benoist Duportail, une note sur le nettoyage des machines en service sur les chemins de fer.

De M. Jobard, un exemplaire de son ouvrage destiné à établir et à défendre les droits de chacun à la propriété des œuvres de sa création.

Les membres nouvellement admis sont :

Au mois de mai,

MM. De Miranda, présenté par MM. Eug. Flachat, Paul Seguin et Degousée;

Bossu, présenté par MM. Eug. Flachat, Ch. Goschler et G. Loustau ;

Haussoullier, présenté par MM. Lorentz, Limet et Alcan.

Au mois de juin,

MM. Michelant, présenté par MM. Eug. Flachat, J. Petiet et Lorentz ;

Paquin, présenté par MM. La Salle, Caillet et Bonnefoy.

que la valeur numérique du coefficient A_2, le premier de ceux que l'on néglige sous les sommes Σ n'atteint pas même trois cent-millièmes.)

On pourra dans les autres équations négliger les termes qui sont affectés des coefficients A_3 et B_2, et les sommes Σ se trouveront réduites à leurs premiers termes. Au moyen des valeurs numériques présentées dans la note du n° 13, et qui supposent la longueur de la bielle égale à cinq fois celle de la manivelle, nous avons calculé les expressions suivantes, auxquelles peuvent se réduire les termes en k et w_0 dans cette circonstance :

$$\left.\begin{array}{ll}
\text{Equation } (z) & \left\{\begin{array}{l} +0{,}040\,4077\,kA\cos\theta\sin 2\alpha\,\dfrac{d^2\alpha}{dt^2} \\ +0{,}080\,8154\,kA\cos\theta\cos 2\alpha\,\dfrac{d\alpha^2}{dt^2}, \end{array}\right. \\
\text{Equation } (x) & \left\{\begin{array}{l} +0{,}040\,4077\,kA\sin\theta\sin 2\alpha\,\dfrac{d^2\alpha}{dt^2} \\ +0{,}080\,8154\,kA\sin\theta\cos 2\alpha\,\dfrac{d\alpha^2}{dt^2}, \end{array}\right. \\
\text{Equation } (y) & \left\{\begin{array}{l} -0{,}007\,1978\,w_0\sin\left(3\alpha+\dfrac{\pi}{4}\right)\dfrac{d^2\alpha}{dt^2} \\ -0{,}021\,5934\,w_0\cos\left(3\alpha+\dfrac{\pi}{4}\right)\dfrac{d\alpha^2}{dt^2}. \end{array}\right.
\end{array}\right\} (59)$$

Dans ces derniers termes, $-\sin\left(3\alpha+\frac{\pi}{4}\right)$ remplace $\cos 3\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right)$, tandis que $\cos\left(3\alpha+\frac{\pi}{4}\right)$ remplace $\sin 3\left(\alpha+\frac{\pi}{4}\right)$.

Si une plus grande précision était nécessaire, ce qui n'est pas présumable dans le cas des locomotives, rien ne serait plus facile que de calculer des tables des fonctions représentées par les sommes Σ associées aux facteurs $\cos\varphi$ et $\frac{1}{B_0}$, pour les valeurs de l'angle α, de 5 en 5 degrés par exemple.

Les équations qui précèdent, étant au nombre de six seulement, ne suffisent pas, si on les applique à une locomotive donnée, pour faire connaître individuellement les valeurs des

onze composantes qu'elles renferment. Il faudrait, d'après ce qui a été dit au n° 5, y joindre cinq relations arbitraires, qui seraient tirées de considérations relatives : à l'élasticité ; à la répartition des pressions transmises aux rails, rendue arbitraire entre certaines limites au moyen du serrage des ressorts de suspension ; et à l'inclinaison de la tangente commune à la courbe de contact des roues et des rails.

En supposant que l'on soit parvenu à déduire la valeur de chaque composante d'un nombre suffisant d'équations, on aura la mesure de la résistance que doivent présenter les rails dans tous les sens. Les composantes H... serviront au calcul de leur flexion dans le sens vertical. Les composantes G..., outre la flexion horizontale qu'elles détermineront, avertiront s'il doit se produire des glissements transversaux ; ce qui aurait lieu si la composante G... dépassait le produit de la composante H... par le coefficient de frottement. Pareillement, il y aurait glissement dans le sens de la voie si la composante F... se trouvait être supérieure à ce même produit. Mais il ne suffit pas, avons-nous dit, que les réactions restent comprises entre leurs limites extrêmes, il faut encore que leurs variations demeurent très petites.

Quoiqu'il ne soit pas possible, sans avoir recours à l'élasticité, etc., d'obtenir les onze composantes des réactions des rails, on peut néanmoins former certaines combinaisons utiles à examiner. Par exemple, en combinant par addition et soustraction l'équation $[z]$ avec l'équation (x) divisée par E, on obtiendra les valeurs séparées des sommes des réactions normales qui s'exercent sur les roues situées d'un même côté du plan méridien, et l'on pourra rechercher quelle est la valeur de l'angle α pour lequel ces sommes sont des *maximum* ou *minimum*. Si l'on élimine $F+F_1$ entre l'équation $[x]$ et l'équation (y), et que l'on suppose $l=0$, $l''=-l'$, on aura la différence entre les sommes des réactions normales exercées sur le système des roues d'avant et sur celui des roues d'arrière.

Quelles que soient d'ailleurs les combinaisons que l'on essaie de

tirer de nos équations, on doit observer que les facteurs $\sin\alpha$ et $\cos\alpha$ des termes variables principaux passent de la valeur $+1$ à la valeur -1, pour revenir à la première, dans la période d'un tour de la roue motrice, et que l'amplitude des variations est égale au double de la valeur des coefficients de chacun de ces termes. Comme, en outre, un grand nombre d'entre eux est proportionnel au carré de la vitesse, il est aisé de voir que ces variations peuvent, en se combinant avec les actions constantes, donner des résultats qui, dans une partie de la période d'un tour de roue, soient excessifs, et dans l'autre approchent d'être nuls. Il en résulte d'un côté une fatigue extrême des rails, et de l'autre un glissement des roues motrices qui détermine rapidement leur détérioration. Nous ne nous arrêterons pas à donner des exemples numériques qui mettent en évidence des faits qu'aucun ingénieur ne révoque en doute; chacun, du reste, y suppléera aisément. Nous allons revenir à notre but primitif, qui est la recherche des conditions à remplir pour que les variations dont nous venons de parler s'anéantissent, s'il est possible.

RÉSOLUTION DES ÉQUATIONS DE CONDITION.

21. Les équations de condition du n° 19 sont au nombre de douze. Les dix premières ont pour objet d'anéantir les termes principaux; les deux autres sont relatives à des termes du 2e ordre et du 4e ordre, et qui sont sans importance (*), mais qui

---

(*) Le degré d'importance des termes d'ordres supérieurs est encore moindre que ne l'indique leur ordre de grandeur. En effet, les termes des séries dont les coefficients sont A_{2i}, et l'ordre $4i$, ont pour facteurs variables les sinus et cosinus des angles $4i\alpha$; les périodes dans lesquelles toutes leurs variations se réalisent répondent à $\frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{12}\ldots$ de tour de manivelle. Les termes en A_{2i+1}, et qui sont de l'ordre $4i+2$, ont pour coefficients les sinus et cosinus des angles $(4i+2)\alpha$; leurs périodes répondent à $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{10}\ldots$ de

dans certains cas pourraient disparaître avec les autres. On doit remarquer que chacune de ces équations, en faisant disparaître les termes affectés du carré $\frac{d\alpha^2}{dt^2}$ de la vitesse, annule en même temps les termes affectés de la variation $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ de cette vitesse.

Les équations marquées (53), au nombre de huit, étant traitées à part, se réduisent à un moindre nombre.

En retranchant la 4e de la 1re équation (53), les quantités sous le signe Σ s'éliminent, et il reste

$$U - U' = 0, \tag{60}$$

après que l'on a divisé par $(\cos\theta - \sin\theta)$.

La 2e et la 3e, étant ajoutées, reproduisent l'équation que nous venons d'écrire.

Les quatre autres équations (53) fournissent de même deux fois l'équation suivante :

$$V - V' = 0; \tag{61}$$

en sorte que nos huit équations équivalent au plus à six équations distinctes.

Mais d'après les équations (51) on a

$$U - U' = u_0 - u'_0, \quad V - V' = v_0 - v'_0;$$

et, en se reportant aux expressions (48),

$$U - U' = \left[M'\left(1 - \frac{B'}{B}\right) + M''\right] r, \quad V - V' = \left[M'\left(1 - \frac{B'}{B}\right) + M''\right] r\Lambda,$$

d'où, en vertu de (49),

$$U - U' = k\frac{r}{B}; \quad V - V' = k\frac{r}{B}\Lambda. \tag{62}$$

---

tour de manivelle. Enfin les termes en B_i, et qui sont de l'ordre $2i$, ont pour coefficients les sinus et cosinus des angles $(2i+1)\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right)$; les périodes de ces termes sont de $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{7}$.... de tour. Les altérations locales des bandages que pourraient produire ces divers termes ne sont donc point à redouter.

Il s'ensuit que les équations (60) et (61) reviennent à l'équation unique

$$k=0. \qquad (63)$$

[Notons, en passant, que cette condition coïncide avec l'équation (55).]

Les huit équations (53) n'équivalent donc réellement qu'à cinq équations distinctes, que l'on peut concevoir formées en prenant quatre de ces équations ne comprenant pas les mêmes combinaisons des quantités affectées du signe Σ, et y joignant l'équation de condition (63).

Nous devons présenter une conséquence importante : c'est que, de quelque manière que l'on essaie de disposer des quantités μ. ρ, ϵ, engagées sous les signes Σ, il ne sera pas possible de satisfaire simultanément aux huit équations (53) si la condition $k=0$ n'a pas lieu.

Examinons maintenant cette dernière : la valeur de k est (49)

$$k=M'(B-B')+M''B.$$

$B-B'$ est la distance du centre de gravité de la bielle à l'axe du bouton de la manivelle; par suite $M'(B-B')$ est le moment de la masse de la bielle par rapport à cet axe; $M''B$ est le moment de la masse du piston supposée concentrée à l'extrémité de la bielle : la valeur de k est donc égale au moment de la bielle, supposée chargée à son extrémité du poids du piston, par rapport à l'axe du bouton; il s'ensuit que la condition $k=0$ ne peut être remplie sans l'addition d'une certaine masse appliquée sur le prolongement de la bielle. C'est d'ailleurs ce que l'on obtiendrait en tirant de l'équation $k=0$ la valeur de $B'-B$; il viendrait en effet

$$B'-B=\frac{M''}{M'}B,$$

ce qui signifie que la distance du centre de gravité de la bielle à la tête du piston doit être plus grande que la longueur B de la bielle.

Il ne paraît pas que cette condition puisse être complétement

réalisée, même dans les machines à cylindres extérieurs où l'espace permet le prolongement nécessaire, à cause de l'accroissement de rigidité qu'il faudrait donner à cette pièce et aux boutons de manivelle pour résister aux efforts énormes qui se développeraient dans les grandes vitesses. D'ailleurs ces efforts eux-mêmes donneraient naissance à des frottements qui absorberaient un travail mécanique très considérable. Cependant, entre la forme actuelle de la bielle et une modification de cette forme et de sa masse, qui serait accompagnée de fâcheux résultats, on conçoit la possibilité de modifications avantageuses au point de vue de la stabilité, et exemptes à peu près des inconvénients que nous venons de signaler. Nous reviendrons bientôt sur ce sujet.

Des considérations qui précèdent il résulte qu'il n'est pas généralement possible de satisfaire à l'équation (63), et, par suite, à l'ensemble des huit équations (53); aussi regarderons-nous, pour le moment, la qualité k comme étant quelconque et donnée en fonction des masses de la bielle et du piston, de la longueur de la bielle et de la distance de son centre de gravité à la tête du piston.

22. Revenons aux équations de condition (53). Il convient d'y mettre en évidence la quantité k. A cet effet, on tire des équations (62)

$$U' = U - k\frac{r}{B}, \quad V' = V - k\frac{r}{B}A.$$

Au moyen de ces valeurs, les termes en U, U', V, V', de nos équations de condition, donnent respectivement

$$\left.\begin{aligned}
U\cos\theta + U'\sin\theta &= +U(\cos\theta + \sin\theta) - k\frac{r}{B}\sin\theta \\
U\cos\theta - U'\sin\theta &= +U(\cos\theta - \sin\theta) + k\frac{r}{B}\sin\theta \\
U\sin\theta - U'\cos\theta &= -U(\cos\theta - \sin\theta) + k\frac{r}{B}\cos\theta \\
U\sin\theta + U'\cos\theta &= +U(\cos\theta + \sin\theta) - k\frac{r}{B}\cos\theta.
\end{aligned}\right\} \quad (64)$$

$$\left.\begin{aligned}
V\cos\theta - V'\sin\theta &= +V(\cos\theta - \sin\theta) + k\frac{r}{B}A\sin\theta \\
V\cos\theta + V'\sin\theta &= +V(\cos\theta + \sin\theta) - k\frac{r}{B}A\sin\theta \\
V\sin\theta + V'\cos\theta &= +V(\cos\theta + \sin\theta) - k\frac{r}{B}A\cos\theta \\
V\sin\theta - V'\cos\theta &= -V(\cos\theta - \sin\theta) + k\frac{r}{B}A\cos\theta
\end{aligned}\right\} (65)$$

Ces valeurs doivent actuellement être substituées dans les équations (53); mais nous profiterons de ce que ces équations renferment deux à deux les mêmes combinaisons des sommes Σ, pour écrire les huit équations sous la forme de quatre seulement. Les premiers membres seront communs à deux équations dont les seconds membres auront deux valeurs distinctives. En divisant, en outre, les quatre dernières équations par λ, nous aurons les équations multiples que voici :

$$\left.\begin{aligned}
U(\cos\theta + \sin\theta) + \Sigma\mu\rho\cos\varepsilon - \Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1 &= +k\frac{r}{B}\sin\theta \quad [x],\ (y) \\
U(\cos\theta - \sin\theta) + \Sigma\mu\rho\sin\varepsilon + \Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1 &= -k\frac{r}{B}\sin\theta \quad [x],\ (y) \\
\frac{V}{\lambda}(\cos\theta - \sin\theta) + \Sigma\mu\rho\cos\varepsilon + \Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1 &= -k\frac{r}{B}\sin\theta\frac{\Lambda}{\lambda} \quad (z) \\
\frac{V}{\lambda}(\cos\theta + \sin\theta) - \Sigma\mu\rho\sin\varepsilon + \Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1 &= +k\frac{r}{B}\sin\theta\frac{\Lambda}{\lambda} \quad (z)
\end{aligned}\right\} \begin{matrix}(A)\\ \\ \\ \

tisfaites, il ne devra se produire aucune tendance aux mouvements de *tangage* et de *lacet*. En égalant les premiers membres aux termes compris dans la colonne (B), on satisfera pareillement aux conditions de l'invariabilité des composantes parallèles à l'axe des z et des moments autour de l'axe des x; ce qui revient à dire que les tendances aux *oscillations normales* à la voie et au mouvement de *roulis* n'existeront pas si les nouvelles équations sont satisfaites.

La notation (y) commune aux deux premières équations rappelle qu'on fera disparaître, dans l'un et l'autre cas, des inégalités qui affectent les mouvements autour de l'axe des y, et qui répondent à la tendance au mouvement de *galop*. Ces inégalités sont peu considérables, puisqu'elles ne dépendent pas du carré de la vitesse, mais seulement du poids des pièces mobiles et de la variation de vitesse. D'ailleurs, il existe d'autres conditions plus importantes relativement au mouvement de *galop*, ce sont les équations (54).

Nous pouvons donc, en faisant abstraction de la notation (y), énoncer la proposition suivante :

Si l'on satisfait au système des équations (A), ***on fera disparaître les tendances au mouvement de*** tangage ***et de*** lacet ; ***si l'on satisfait au système des équations*** (B), ***on fera disparaître les tendances aux*** oscillations normales ***au plan de la voie et au mouvement de*** roulis ; ***mais il est impossible de faire disparaître à la fois ces diverses tendances si la condition $k=0$ n'est pas remplie.***

La dernière partie de cette proposition est rendue de nouveau évidente par l'égalité nécessaire des termes des colonnes (A) et (B) situés sur la même ligne horizontale; les quatre équations qui en résultent ne peuvent avoir lieu que sous la condition $k=0$.

L'énoncé qui précède nous dispensera, dans ce qui va suivre, de conserver les notations $[x]$, $[z]$, etc; nous conserverons simplement la notation (A) et (B), qui les résume.

En combinant par voie d'addition et de soustraction les équations (65 *bis*), on obtient aisément :

$$\left.\begin{array}{l|l}
\underbrace{\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)\cos\theta+\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)\sin\theta+2\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon=+k\frac{r}{B}\sin\theta\left(1-\frac{A}{\lambda}\right)}_{(A)} & \underbrace{=+k\frac{r}{B}\cos\theta\left(1+\frac{A}{\lambda}\right)}_{(B)} \\
\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)\cos\theta-\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)\sin\theta+2\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon=-k\frac{r}{B}\sin\theta\left(1+\frac{A}{\lambda}\right) & =+k\frac{r}{B}\cos\theta\left(1-\frac{A}{\lambda}\right) \\
\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)\cos\theta-\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)\sin\theta+2\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1=-k\frac{r}{B}\sin\theta\left(1-\frac{A}{\lambda}\right) & =+k\frac{r}{B}\cos\theta\left(1+\frac{A}{\lambda}\right) \\
\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)\cos\theta-\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)\sin\theta+2\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1=-k\frac{r}{B}\sin\theta\left(1+\frac{A}{\lambda}\right) & =-k\frac{r}{B}\cos\theta\left(1-\frac{A}{\lambda}\right)
\end{array}\right\} \quad (66)$$

Ces relations nous permettent déjà de constater que l'on ne pourrait faire à la fois pour chaque couple de roues $\rho_1=\rho$ et $\varepsilon_1=-\varepsilon$ que si l'on avait en même temps $\theta=0$ et $k=0$.

La substitution de la valeur $\varepsilon-\theta$ à la place de ε (47) va nous offrir le moyen de remplacer les deux systèmes (A) et (B) par un système unique (C) qui restera indéterminé. A cet effet, il faudra développer les sinus et cosinus de $\varepsilon-\theta$ et de $\varepsilon_1-\theta$, en observant que $\sin\theta$ et $\cos\theta$ seront des facteurs communs des sommes Σ. D'autre part, nous allons changer dans les seconds membres les facteurs $\left(1-\frac{A}{\lambda}\right)$ et $\left(1+\frac{A}{\lambda}\right)$.

Soient υ et Θ des quantités auxiliaires telles que l'on ait

$$\left.\begin{array}{l}
\upsilon\sin\Theta=\lambda-A, \\
\upsilon\cos\Theta=\lambda+A;
\end{array}\right\} \quad (67)$$

on aura, pour déterminer l'angle Θ, l'expression

$$\operatorname{tang}\Theta=\frac{\lambda-A}{\lambda+A}; \quad (68)$$

puis

$$\upsilon(\cos\Theta+\sin\Theta)=2\lambda,$$

d'où

$$\frac{\upsilon}{\lambda}=\frac{2}{\cos\Theta+\sin\Theta}=\frac{\sqrt{2}}{\sin\left(\Theta+\frac{\pi}{4}\right)}.$$

En divisant les expressions (67) par λ, et substituant la valeur

précédente de $\frac{r}{\lambda}$, il vient

$$1-\frac{\Lambda}{\lambda}=\sqrt{2}\frac{\sin\theta}{\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)},$$

$$1+\frac{\Lambda}{\lambda}=\sqrt{2}\frac{\cos\theta}{\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)}.$$

On doit remarquer que l'ambiguïté de l'angle θ n'en produit pas dans les valeurs précédentes, puisque le changement de θ en $\theta\pm\pi$ produit un changement simultané des signes des numérateurs et des dénominateurs.

Posons enfin

$$k'=k\frac{r}{\sqrt{2}B}\frac{1}{\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)}, \tag{69}$$

ou, en vertu de l'équation (35),

$$k'=k\frac{\sin\varphi}{\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)}; \tag{70}$$

nous aurons

$$\left.\begin{aligned} k\frac{r}{B}\left(1-\frac{\Lambda}{\lambda}\right)&=2k'\sin\theta,\\ k\frac{r}{B}\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right)&=2k'\cos\theta. \end{aligned}\right\} \tag{71}$$

En effectuant ces divers changements dans les équations (66), il viendra

$$\begin{array}{l|l|l}
 & \overbrace{\qquad\qquad\qquad\qquad}^{(A)} & \overbrace{\qquad\qquad}^{(B)}\\
+\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)\cos\theta+\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)\sin\theta+2\cos\theta\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon+2\sin\theta\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon=+2k'\sin\theta\sin\theta & =+2k'\cos\theta\cos\\
-\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)\sin\theta+\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)\cos\theta-2\sin\theta\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon+2\cos\theta\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon=-2k'\sin\theta\cos\theta & =+2k'\cos\theta\sin\\
+\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)\cos\theta-\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)\sin\theta+2\cos\theta\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1+2\sin\theta\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1=-2k'\sin\theta\sin\theta & =+2k'\cos\theta\cos\\
-\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)\sin\theta-\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)\cos\theta-2\sin\theta\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1+2\cos\theta\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1=-2k'\sin\theta\cos\theta & =-2k'\cos\theta\sin
\end{array}$$

Multipliant maintenant la première de ces équations par $\sin\theta$, la deuxième par $\cos\theta$, et ajoutant; puis, la première par $\cos\theta$, et la deuxième par $\sin\theta$, et retranchant; et opérant de même sur les deux autres, on aura

$$\left.\begin{array}{l|l}
+\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)+2\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon=-2k'\sin\theta\cos(\theta+\Theta) & =+2k'\cos\theta\sin(\theta+\Theta)\\
+\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+2\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon=+2k'\sin\theta\sin(\theta+\Theta) & =+2k'\cos\theta\cos(\theta+\Theta)\\
-\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)+2\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1=-2k'\sin\theta\cos(\theta-\Theta) & =+2k'\cos\theta\sin(\theta-\Theta)\\
+\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+2\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1=+2k'\sin\theta\sin(\theta-\Theta) & =+2k'\cos\theta\cos(\theta-\Theta)
\end{array}\right\}\quad(73)$$

(A) (B)

Il est visible que, si l'on change, dans le système (A), θ en $\theta\pm\frac{\pi}{2}$, on obtiendra le système (B). Ces deux systèmes pourront donc être représentés par un système unique (C) ayant la forme (A), pourvu que l'on y change θ en $\theta+\theta'$; θ' désignant un angle indéterminé tel que, le faisant égal à zéro ou $\pm\pi$, le système (C) reproduit le système (A), et, en faisant $\theta'=\pm\frac{\pi}{2}$ il se change en le système (B). En effectuant ce changement dans le système (A) et tirant les valeurs des quantités Σ, on obtient le système unique et indéterminé

(C)

$$\left.\begin{array}{l}
\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon=-\frac{1}{2}\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)-k'\sin(\theta+\theta')\cos(\theta+\theta'+\Theta)\\
\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon=-\frac{1}{2}\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+k'\sin(\theta+\theta')\sin(\theta+\theta'+\Theta)\\
\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1=+\frac{1}{2}\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)-k'\sin(\theta+\theta')\cos(\theta+\theta'-\Theta)\\
\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1=-\frac{1}{2}\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+k'\sin(\theta+\theta')\sin(\theta+\theta'-\Theta)
\end{array}\right\}\quad(74)$$

dans lequel, pour plus de généralité, nous devons regarder θ' comme affecté du double signe $\pm$; nous supprimons ce dou-

ble signe afin de ne pas compliquer les notations. On remarquera que le changement de θ' en $\pi+\theta'$ n'en apporte aucun dans ce système. Nous préciserons plus loin la signification mécanique de l'angle θ', en étudiant le mouvement du centre de gravité de la locomotive armée de ses contrepoids.

De ces équations on déduit aisément les deux relations suivantes, qui peuvent être employées utilement à la vérification des calculs numériques :

$$\left.\begin{aligned}\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon+\Sigma\mu\rho_1\sin\varepsilon_1&=-k'\sin 2(\theta+\theta')\cos\Theta\\ \Sigma\mu\rho\cos\varepsilon-\Sigma\mu\rho_1\cos\varepsilon_1&=-k'\sin 2(\theta+\theta')\sin\Theta\end{aligned}\right\}\quad(75)$$

Ces relations montrent que, dans le cas où k' ou k n'est pas nul, on ne peut pas faire à la fois pour chaque paire de roue $\rho_1=\rho$ et $\varepsilon_1=-\varepsilon$, si l'on n'a pas $\sin 2(\theta+\theta')=0$, ou bien si la somme des angles θ et θ' n'est pas égale à zéro ou à un multiple de l'angle droit.

En observant que le système (A) est caractérisé par $\theta'=0$ ou $\pm\pi$ dans les équations (C), et le système (B) par $\theta'=\pm\frac{\pi}{2}$, nous pouvons transformer la proposition énoncée plus haut dans la suivante :

Si l'on satisfait aux équations (C) *en y faisant* $\theta'=0$ *ou* $\pm\pi$, *on fera disparaître les tendances aux mouvements de* tangage *et de* lacet; *si l'on satisfait à ces mêmes équations en y faisant* $\theta'=\pm\frac{\pi}{2}$, *on anéantira les tendances aux* oscillations normales *au plan de la voie et au mouvement de* roulis; *mais il sera impossible d'anéantir à la fois ces diverses tendances tant que la condition* $k=0$ *ne sera pas remplie.*

L'association des angles θ et θ' sous la forme $\theta+\theta'$ dans les formules (C) est digne de remarque. Elle montre que la disparition des deux derniers mouvements s'obtient par les conditions qui feraient disparaître les deux premiers dans une locomotive où l'axe du piston serait à angle droit avec la direction donnée de cet axe.

Les équations (C), quand on y fait à la fois $\theta=0$ et $\theta'=0$, sont

équivalentes aux règles données par M. Lechatelier dans le cas des machines à cylindres horizontaux. Il est clair, dès lors, que le procédé de M. Lechatelier ne peut pas détruire les tendances aux *oscillations normales* et au mouvement de *roulis*. Ces règles sont d'ailleurs les seules que l'on trouve dans l'ouvrage de cet ingénieur; et, comme les équations de condition relatives au mouvement de *galop*, qu'il a entièrement négligées, établissent de nouvelles relations entre les quantités sous les sommes Σ, il est à craindre que l'emploi des seules règles de M. Lechatelier n'ait souvent pour résultat de développer des tendances au mouvement de *galop*, qui n'auraient pas existé avant l'application de ses contrepoids.

En désignant par μ la masse d'une roue motrice, et ρ la distance de son centre de gravité à l'axe de l'essieu, notre intention était de montrer que la théorie de la stabilité aurait conduit à l'emploi des contrepoids, si ce procédé n'avait pas été déjà indiqué. En effet, les équations (C) et celles que nous obtiendrons plus bas relativement au mouvement de *galop* montrent que la quantité ρ ne saurait généralement être nulle, et que, par suite, le centre de gravité des roues motrices doit généralement être distant de l'axe, résultat qui indique évidemment la nécessité d'employer des contrepoids. La théorie nous aurait donc conduit à ce résultat, comme elle nous a fait connaître la nécessité de prolonger la bielle.

Le produit $\mu\rho$ se compose de deux termes, l'un relatif à la roue supposée centrée, et l'autre au contrepoids dont elle est armée. Le premier de ces termes est évidemment nul : en sorte que nous pouvons, dans nos équations de condition, supposer que μ désigne la masse d'un contrepoids, et ρ la distance de son centre de gravité à l'axe de l'essieu. C'est ce que nous ferons dorénavant.

Avant d'employer les équations (C) à la détermination des contrepoids et de nous occuper des équations (54), il est convenable de rechercher ce que deviennent les auxiliaires $C\cos\Phi$, $C\sin\Phi$, etc. (53), lorsque les contrepoids sont calculés de ma-

nière à satisfaire aux équations (C) : l'analogie des calculs à effectuer avec ceux que nous venons de présenter nous en fait une obligation.

CALCUL DES VALEURS QUE PRENNENT LES COEFFICIENTS $C\cos\Phi$, $C\sin\Phi$, ETC., LORSQUE LES CONTREPOIDS SATISFONT AUX ÉQUATIONS (74).

23. Les valeurs (53) contiennent sous les sommes Σ les angles ϵ et ϵ_1. Nous avons à déduire les valeurs de ces sommes des expressions (74) qui contiennent ϵ ou ϵ_1 sous les signes Σ. A cet effet, l'on aura

$$\Sigma\mu\rho\sin\epsilon = \cos\theta\,\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon - \sin\theta\,\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon,$$
$$\Sigma\mu\rho\cos\epsilon = \sin\theta\,\Sigma\mu\rho\sin\varepsilon + \cos\theta\,\Sigma\mu\rho\cos\varepsilon;$$

on aurait deux autres formules toutes pareilles en affectant de l'indice $_1$ les lettres ϵ et ε. En y substituant pour les sommes en ε et ε_1 leurs valeurs (74), et réduisant, il viendra

$$\Sigma\mu\rho\,\sin\epsilon = -\frac{1}{2}U(\cos\theta-\sin\theta)+\frac{1}{2}\frac{V}{\lambda}(\cos\theta+\sin\theta)-k'\sin(\theta+\theta')\cos(\theta'+\Theta),$$
$$\Sigma\mu\rho\,\cos\epsilon = -\frac{1}{2}U(\cos\theta+\sin\theta)-\frac{1}{2}\frac{V}{\lambda}(\cos\theta-\sin\theta)+k'\sin(\theta+\theta')\sin(\theta'+\Theta),$$
$$\Sigma\mu\rho_1\sin\epsilon_1 = +\frac{1}{2}U(\cos\theta+\sin\theta)-\frac{1}{2}\frac{V}{\lambda}(\cos\theta-\sin\theta)-k'\sin(\theta+\theta')\cos(\theta'-\Theta),$$
$$\Sigma\mu\rho_1\cos\epsilon_1 = -\frac{1}{2}U(\cos\theta-\sin\theta)-\frac{1}{2}\frac{V}{\lambda}(\cos\theta+\sin\theta)+k'\sin(\theta+\theta')\sin(\theta'-\Theta).$$

Ces quantités étant actuellement transportées dans les équations (53), et les valeurs (64) et (65) mises à la place des deux premiers termes des seconds membres, les quatre premiers coefficients deviendront, toutes réductions faites,

$$\left.\begin{aligned}
C\cos\Phi &= -k\frac{r}{B}\sin\theta + k'\sin(\theta+\theta')[\sin(\theta'+\Theta)+\cos(\theta'-\Theta)]\\
C\sin\Phi &= +k\frac{r}{B}\sin\theta - k'\sin(\theta+\theta')[\cos(\theta'+\Theta)-\sin(\theta'-\Theta)]\\
C'\cos\Phi' &= +k\frac{r}{B}\cos\theta + k'\sin(\theta+\theta')[\cos(\theta'+\Theta)-\sin(\theta'-\Theta)]\\
C'\sin\Phi' &= -k\frac{r}{B}\cos\theta + k'\sin(\theta+\theta')[\sin(\theta'+\Theta)+\cos(\theta'-\Theta)]
\end{aligned}\right\} \quad (76)$$

Les quatre autres coefficients, étant pour plus de simplicité divisés par λ, deviendront de même

$$\left.\begin{aligned}
\tfrac{1}{\lambda}D\sin\Psi &= +k\frac{r}{B}\frac{\Lambda}{\lambda}\sin\theta + k'\sin(\theta+\theta')[\sin(\theta'+\Theta)-\cos(\theta'-\Theta)]\\
\tfrac{1}{\lambda}D\cos\Psi &= -k\frac{r}{B}\frac{\Lambda}{\lambda}\sin\theta + k'\sin(\theta+\theta')[\cos(\theta'+\Theta)+\sin(\theta'-\Theta)]\\
\tfrac{1}{\lambda}D'\sin\Psi' &= -k\frac{r}{B}\frac{\Lambda}{\lambda}\cos\theta + k'\sin(\theta+\theta')[\cos(\theta'+\Theta)+\sin(\theta'-\Theta)]\\
\tfrac{1}{\lambda}D'\cos\Psi' &= +k\frac{r}{B}\frac{\Lambda}{\lambda}\cos\theta - k'\sin(\theta+\theta')[\sin(\theta'+\Theta)-\cos(\theta'-\Theta)]
\end{aligned}\right\}\quad(77)$$

Les coefficients de $k'\sin(\theta+\theta')$ dans ces expressions, étant développés, donnent

$$\left.\begin{aligned}
\sin(\theta'+\Theta)+\cos(\theta'-\Theta) &= +(\cos\Theta+\sin\Theta)(\cos\theta'+\sin\theta')\\
\cos(\theta'+\Theta)-\sin(\theta'-\Theta) &= +(\cos\Theta+\sin\Theta)(\cos\theta'-\sin\theta')\\
\sin(\theta'+\Theta)-\cos(\theta'-\Theta) &= -(\cos\Theta-\sin\Theta)(\cos\theta'-\sin\theta')\\
\cos(\theta'+\Theta)+\sin(\theta'-\Theta) &= +(\cos\Theta-\sin\Theta)(\cos\theta'+\sin\theta')
\end{aligned}\right\}\quad(78)$$

D'un autre côté, en ajoutant et retranchant les équations (71), puis divisant par 2, il vient

$$\left.\begin{aligned}
k'(\cos\Theta+\sin\Theta) &= k\frac{r}{B},\\
k'(\cos\Theta-\sin\Theta) &= k\frac{r}{B}\frac{\Lambda}{\lambda}.
\end{aligned}\right\}\quad(79)$$

Si nous substituons les deux premières valeurs (78) dans les équations (76), et que nous ayons égard à la première équation (79), nous aurons

$$\left.\begin{aligned}
C\cos\Phi &= +k\frac{r}{B}[-\sin\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'+\sin\theta')]\\
C\sin\Phi &= -k\frac{r}{B}[-\sin\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'-\sin\theta')]\\
C'\cos\Phi' &= +k\frac{r}{B}[+\cos\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'-\sin\theta')]\\
C'\sin\Phi' &= -k\frac{r}{B}[+\cos\theta-\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'+\sin\theta')]
\end{aligned}\right\}\quad(80)$$

A l'aide des dernières valeurs (78), et de la deuxième équa-

tion (79), les équations (77) donneront, en supprimant le facteur commun $\frac{1}{\lambda}$,

$$\left.\begin{aligned}
D\sin\Psi &= -k\frac{r}{B}\Lambda[-\sin\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'-\sin\theta')]\\
D\cos\Psi &= +k\frac{r}{B}\Lambda[-\sin\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'+\sin\theta')]\\
D'\sin\Psi' &= -k\frac{r}{B}\Lambda[+\cos\theta-\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'+\sin\theta')]\\
D'\cos\Psi' &= +k\frac{r}{B}V[+\cos\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'-\sin\theta')]
\end{aligned}\right\} \quad (81)$$

Il reste à opérer ici des réductions. On a d'abord

$$\sin(\theta+\theta')=\sin\theta\cos\theta'+\cos\theta\sin\theta',$$

d'où

$$\begin{aligned}
\sin(\theta+\theta')\cos\theta' &= \sin\theta\cos^2\theta'+\cos\theta\sin\theta'\cos\theta',\\
\sin(\theta+\theta')\sin\theta' &= \cos\theta\sin^2\theta'+\sin\theta\sin\theta'\cos\theta';
\end{aligned}$$

puis

$$\begin{aligned}
\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'+\sin\theta') &= \sin\theta\cos^2\theta'+\cos\theta\sin^2\theta'+(\cos\theta+\sin\theta)\sin\theta'\cos\theta',\\
\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'-\sin\theta') &= \sin\theta\cos^2\theta'-\cos\theta\sin^2\theta'+(\cos\theta-\sin\theta)\sin\theta'\cos\theta'.
\end{aligned}$$

Soient, pour abréger,

$$\begin{aligned}
(a) &= -\sin\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'+\sin\theta')\\
(b) &= -\sin\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'-\sin\theta')\\
(c) &= +\cos\theta+\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'-\sin\theta')\\
(d) &= +\cos\theta-\sin(\theta+\theta')(\cos\theta'+\sin\theta')
\end{aligned}$$

nous aurons, en faisant usage des deux précédentes relations,

$$\begin{aligned}
(a) &= -\sin\theta\sin^2\theta'+\cos\theta\sin^2\theta'+(\cos\theta+\sin\theta)\sin\theta'\cos\theta'\\
(b) &= -\sin\theta\sin^2\theta'-\cos\theta\sin^2\theta'+(\cos\theta-\sin\theta)\sin\theta'\cos\theta'\\
(c) &= +\sin\theta\cos^2\theta'+\cos\theta\cos^2\theta'+(\cos\theta-\sin\theta)\sin\theta'\cos\theta'\\
(d) &= -\sin\theta\cos^2\theta'+\cos\theta\cos^2\theta'-(\cos\theta+\sin\theta)\sin\theta'\cos\theta'
\end{aligned}$$

puis, en mettant les facteurs communs en évidence,

$$(a) = \sin\theta'[\cos\theta'(\cos\theta+\sin\theta)+\sin\theta'(\cos\theta-\sin\theta)]$$
$$(b) = \sin\theta'[\cos\theta'(\cos\theta-\sin\theta)-\sin\theta'(\cos\theta+\sin\theta)]$$
$$(c) = \cos\theta'[\cos\theta'(\cos\theta+\sin\theta)+\sin\theta'(\cos\theta-\sin\theta)]$$
$$(d) = \cos\theta'[\cos\theta'(\cos\theta-\sin\theta)-\sin\theta'(\cos\theta+\sin\theta)]$$

mais on a $\cos\theta+\sin\theta = \sqrt{2}\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)$,

$$\cos\theta-\sin\theta = \sqrt{2}\cos\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right);$$

substituant, il vient

$$(a) = \sqrt{2}\sin\theta'\left[\cos\theta'\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)+\sin\theta'\cos\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)\right]$$
$$(b) = \sqrt{2}\sin\theta'\left[\cos\theta'\cos\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)-\sin\theta'\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)\right]$$
$$(c) = \sqrt{2}\cos\theta'\left[\cos\theta'\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)+\sin\theta'\cos\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)\right]$$
$$(d) = \sqrt{2}\cos\theta'\left[\cos\theta'\cos\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)-\sin\theta'\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)\right]$$

ou

$$(a) = \sqrt{2}\sin\theta'\sin\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)$$
$$(b) = \sqrt{2}\sin\theta'\cos\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)$$
$$(c) = \sqrt{2}\cos\theta'\sin\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)$$
$$(d) = \sqrt{2}\cos\theta'\cos\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)$$

Au moyen de ces valeurs, les équations (80) et (81) deviennent finalement

$$\left.\begin{aligned}
C\cos\Phi &= +k\frac{r}{B}\sqrt{2}\sin\theta'\sin\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)\\
C\sin\Phi &= -k\frac{r}{B}\sqrt{2}\sin\theta'\cos\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)\\
C'\cos\Phi' &= +k\frac{r}{B}\sqrt{2}\cos\theta'\sin\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)\\
C'\sin\Phi' &= -k\frac{r}{B}\sqrt{2}\cos\theta'\cos\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)
\end{aligned}\right\} \quad (82)$$

$$\left.\begin{aligned} D\sin\Psi &= -k\frac{r}{B}\sqrt{2}\,\Lambda\sin\theta'\cos\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)\\ D\cos\Psi &= +k\frac{r}{B}\sqrt{2}\,\Lambda\sin\theta'\sin\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)\\ D'\sin\Psi' &= -k\frac{r}{B}\sqrt{2}\,\Lambda\cos\theta'\cos\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right)\\ D'\cos\Psi' &= +k\frac{r}{B}\sqrt{2}\,\Lambda\cos\theta'\sin\left(\theta+\theta'+\frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}\right\} \quad (83)$$

(En vertu de l'équation (35), on pourrait remplacer le facteur $k\frac{r}{B}\sqrt{2}$, par $2k\sin\varphi$.)

Les équations précédentes donnent facilement

$$\Phi=\Phi'=\Psi=\Psi'=\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}, \quad (84)$$

$$\left.\begin{aligned} C &= +k\frac{r}{B}\sqrt{2}\sin\theta'\\ C' &= +k\frac{r}{B}\sqrt{2}\cos\theta'\\ D &= +k\frac{r}{B}\sqrt{2}\sin\theta'\Lambda\\ D' &= +k\frac{r}{B}\sqrt{2}\cos\theta'\Lambda \end{aligned}\right\} \quad (85)$$

Les seconds membres des équations (82) et (83) s'annulent avec k, comme nous savions déjà que cela devait être. En outre, k étant supposé ne pas être nul, les quantités C et D, qui sont les coefficients des principales inégalités dans les équations $[x]$ et (z) du n° 20, s'anéantissent lorsque $\theta'=0$ ou $\pm\pi$, tandis que C' et D', qui se rapportent aux équations $[z]$ et (x), ne disparaissent que pour $\theta'=\pm\frac{\pi}{2}$. Ces déductions offrent une confirmation de nos calculs.

Puisque les coefficients C, D, C', D', représentent les demi-amplitudes des variations des réactions et de leurs moments, qui correspondent, d'une part aux mouvements de *tangage* et de *lacet*, de l'autre aux *oscillations normales* et au

mouvement de *roulis*, il est facile d'apprécier l'efficacité d'un système donné de contrepoids établi d'après les formules (74), au point de vue de la tendance à ces divers mouvements.

On y parviendra en calculant le rapport des coefficients (85) aux valeurs des coefficients C, C′, D, D′, avant que la machine soit munie de ses contrepoids; on aura, si l'on peut s'exprimer ainsi, le rapport des perturbations restantes, après l'application des contrepoids, à celles qu'il s'agissait de détruire.

Désignons par C_0, C'_0, D_0, D'_0, les valeurs absolues de C, C′, D, D′, avant l'application des contrepoids. On obtiendra C_0, etc., en égalant à zéro les quantités ρ, ρ_1, dans les équations (53), et faisant la somme des carrés de ces équations prises deux à deux; il viendra de cette manière

$$\begin{aligned}
C_0^2 &= 2(U^2\cos^2\theta + U'^2\sin^2\theta)\\
D_0^2 &= 2(V^2\cos^2\theta + V'^2\sin^2\theta)\\
C'^2_0 &= 2(U^2\sin^2\theta + U'^2\cos^2\theta)\\
D'^2_0 &= 2(V^2\sin^2\theta + V'^2\cos^2\theta),
\end{aligned}$$

et les rapports cherchés seront, en ne considérant que leur valeur absolue,

$$\left.\begin{aligned}
\frac{C}{C_0} &= \frac{k}{B}\frac{r'}{\sqrt{U^4\cos^4\theta + U'^4\sin^2\theta}}\sin\theta'\\
\frac{D}{D_0} &= \frac{k}{B}\frac{Ar}{\sqrt{V^2\cos^4\theta + V'^2\sin^2\theta}}\sin\theta'\\
\frac{C'}{C'_0} &= \frac{k}{B}\frac{r}{\sqrt{U^2\sin^4\theta + U'^4\cos^4\theta}}\cos\theta'\\
\frac{D'}{D'_0} &= \frac{k}{B}\frac{Ar}{\sqrt{V^4\sin^2\theta + V'^4\cos^2\theta}}\cos\theta'
\end{aligned}\right\} \quad (86)$$

24. Pour montrer une application simple de ces formules, nous supposerons qu'il s'agisse d'une machine à cylindres horizontaux, ce qui réduira les radicaux à U, V, U′, V′, (51). En

remontant aux formules (48) et (49), on aura dans ce cas

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{k}{B}=M'\left(1-\frac{B'}{B}\right)+M''\\
&\frac{C}{C_0}=\frac{k}{B}\frac{\sin\theta'}{M'+M''+\Sigma\pm M'''\dfrac{C'''}{r}}\\
&\frac{D}{D_0}=\frac{k}{B}\frac{\sin\theta'}{M'+M''+\Sigma\pm M'''\dfrac{C'''}{r}\dfrac{A'''}{A}}\\
&\frac{C'}{C'_0}=\frac{k}{B}\frac{\cos\theta'}{M'\dfrac{B'}{B}+\Sigma\pm M'''\dfrac{C'''}{r}}\\
&\frac{D'}{D'_0}=\frac{k}{B}\frac{\cos\theta'}{M'\dfrac{B'}{B}+\Sigma\pm M'''\dfrac{C'''}{r}\dfrac{A'''}{A}}
\end{aligned}\right\}\quad(87)$$

Prenons pour exemple une machine à roues indépendantes, que M. Lechatelier étudie dans son ouvrage. En substituant, dans les précédentes équations, les poids aux masses, ce qui ne change pas les résultats, nous aurons (voir pages 52 et 54 de cet ouvrage),

$$M'=77^{kil},\quad M''=107^{kil},\quad M'''\frac{C'''}{r}=60^{kil}.$$

La quantité $M'''\dfrac{C'''}{r}$ représente le poids du bouton de la manivelle, augmenté de ce que l'auteur appelle *poids de la manivelle rapportée à son bouton ;* nous prenons le signe +, attendu que les rayons qui aboutissent au centre de gravité de ces masses sont de même sens que le rayon r de la manivelle; ce terme est d'ailleurs le seul que comprenne ici la somme Σ. La quantité A''' doit différer très peu de A dans la machine dont s'occupe M. Lechatelier: pour plus de simplicité, nous pouvons, sans erreur sensible, supposer $\dfrac{A'''}{A}=1$.

La situation du centre de gravité de la bielle n'est pas don-

née; mais nous avons lieu de croire que M. Lechatelier désigne par *poids de la bielle afférent à la manivelle* ce que nous désignons par $M'\frac{B'}{B}$: nous poserons donc

$$M'\frac{B'}{B}=40^{kg};$$

d'où nous tirons :

$$\frac{B'}{B}=0{,}52,$$

$$\frac{k}{B}=0{,}48\times 77+107=144,$$

$$M'+M''+M'''\frac{C'''}{r}=77+107+60=244,$$

$$M'\frac{B'}{B}+M'''\frac{C'''}{r}=0{,}52\times 77+60=100.$$

Il s'ensuit

$$\frac{C}{C_0}=\frac{D}{D_0}=\frac{144}{244}\sin\theta'=0{,}59\sin\theta',$$

$$\frac{C'}{C'_0}=\frac{D'}{D'_0}=\frac{144}{100}\cos\theta'=1{,}44\cos\theta'.$$

Or, nous avons dit que les règles de M. Lechatelier, relativement aux machines à cylindres horizontaux, se tirent de nos équations (74) en y faisant $\theta'=0$. Introduisons cette valeur de θ' dans les expressions précédentes, et nous reconnaîtrons que, dans le cas actuel, les contrepoids de M. Lechatelier, tout en détruisant à très peu près les tendances au mouvement de *tangage* et de *lacet*, augmentent de 44 pour 100 les coefficients qui mesurent les tendances aux *oscillations normales* et au mouvement de *roulis*. Si les contrepoids étaient calculés avec une valeur de $\theta'=\pm\frac{\pi}{2}$, ces dernières seraient sensiblement détruites, et les premières se trouveraient réduites à 0,59 de leur intensité primitive.

Enfin, si l'on appliquait ici des contrepoids calculés avec une valeur de θ' moyenne entre les deux précédentes, c'est-

à-dire en faisant $\theta' = \pm\frac{\pi}{4}$, il viendrait, abstraction faite des signes,

$$\frac{C}{C_0} = \frac{D}{D_0} = 0{,}42, \qquad \frac{C'}{C'_0} = \frac{D'}{D'_0} = 1{,}02.$$

En d'autres termes, les tendances aux mouvements de *tangage* et de *lacet* seraient réduites aux 4 dizièmes environ de ce qu'elles étaient avant l'application des contrepoids, tandis que les tendances aux *oscillations normales* et au mouvement de *roulis* ne subiraient pas de modifications sensibles.

Les valeurs numériques des quantités (86) et (87) doivent nécessairement varier dans les différents systèmes de locomotives. Il est facile de voir que ces nombres seront moindres dans les machines à roues accouplées où les bielles et manivelles d'accouplement seraient de même sens que les manivelles principales; les inconvénients inhérents à la valeur $\theta' = 0$ y seront moindres que dans les machines à roues indépendantes.

Sans pousser plus loin les recherches numériques, on peut présumer, d'après les nombres précédents, que le mode d'application des contrepoids en usage aujourd'hui n'est pas étranger aux dégradations qu'éprouvent par places les bandages des roues motrices.

Quoi qu'il en soit, on ne doit pas raisonnablement préférer *à priori* un système qui détruit à peu près certains inconvénients et qui en aggrave d'autres. Nous venons de voir que le système $\theta' = \pm\frac{\pi}{2}$ anéantit ceux que le premier aggrave, et réduit en même temps les autres. Ce ne serait cependant pas un motif suffisant de préférer ce système, attendu que le *tangage* et le *lacet* sont plus à redouter que les *oscillations normales* et le *roulis*, à cause des glissements qu'ils peuvent déterminer. Toutefois, on conçoit qu'il existe entre $\theta' = 0$ et $\theta' = \frac{\pi}{2}$ une valeur intermédiaire de cette indéterminée qui fournisse les résultats

les plus avantageux pour un système donné de locomotive. Mais la mécanique expérimentale ne nous fournit pas actuellement de données qui nous permettent d'apprécier la proportion dans laquelle les sommes des composantes et des moments des réactions exercées par les rails concourent à la détérioration locale des bandages. D'un autre côté, l'on ignore à peu près la liaison qui existe entre le travail du frottement et l'usé des tourillons et des glissières. Ce travail lui-même ne saurait être déterminé d'une manière générale, à cause de la variété des appareils de distribution de la vapeur. S'il en était autrement, le calcul des inconvénients inhérents à un système donné de contrepoids serait accessible à l'analyse mathématique. On sera donc obligé d'avoir recours à l'expérience pour fixer la valeur la plus convenable de l'angle θ', et aussi pour déterminer la modification la plus avantageuse à apporter dans la distribution de la masse de la bielle, lorsque l'on consentira à modifier la forme et la masse de cet organe. En présence de l'impossibilité de satisfaire à l'ensemble des équations de condition provenant de $k>0$, et qui permettait d'y déroger d'une infinité de manières différentes, nous sommes heureux d'avoir réussi à introduire l'indéterminée θ' qui réduit considérablement le champ ouvert aux tâtonnements et systématise les recherches expérimentales, comme on le verra plus loin.

SUITE DE LA RÉSOLUTION DES ÉQUATIONS DE CONDITION.

25. Au point où nous en sommes, il devient nécessaire de développer les sommes Σ dans les équations (74); nous rappellerons que leur définition est comprise dans la formule

$$\Sigma\mu\rho\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\varepsilon=\mu\rho\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\varepsilon+\mu'\rho'\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\varepsilon'+\mu''\rho''\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\varepsilon'';$$

nous isolerons le premier terme du second nombre, qui se rapporte à la roue dont l'axe a pour abscisse l, et nous poserons

$$\Sigma\mu'\rho'\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\varepsilon'=\mu'\rho'\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\varepsilon'+\mu''\rho''\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\varepsilon''$$

en sorte que cette dernière somme ne contienne que les termes relatifs aux roues dont les abscisses des axes sont l' et l''. On aurait des expressions toutes pareilles en affectant de l'indice $_1$ les quantités ρ et ε, pour transformer les sommes Σ qui sont relatives aux roues situées du côté des y négatifs.

En effectuant ces changements dans les équations (74), il viendra

$$\left.\begin{aligned}
\mu\rho\sin\varepsilon+\Sigma\mu'\rho'\sin\varepsilon' &= -\frac{1}{2}\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)-k'\sin(\theta+\theta')\cos(\theta+\theta'+\Theta)\\
\mu\rho\cos\varepsilon+\Sigma\mu'\rho'\cos\varepsilon' &= -\frac{1}{2}\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+k'\sin(\theta+\theta')\sin(\theta+\theta'+\Theta)\\
\mu\rho_1\sin\varepsilon_1+\Sigma\mu'\rho'_1\sin\varepsilon'_1 &= +\frac{1}{2}\left(U-\frac{V}{\lambda}\right)-k'\sin(\theta+\theta')\cos(\theta+\theta'-\Theta)\\
\mu\rho_1\cos\varepsilon_1+\Sigma\mu'\rho'_1\cos\varepsilon'_1 &= -\frac{1}{2}\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+k'\sin(\theta+\theta')\sin(\theta+\theta'-\Theta)
\end{aligned}\right\}\quad(88)$$

Ces formules feront connaître $\mu\rho$, ε et $\mu\rho_1$, ε_1, lorsque les quantités Σ, qui sont relatives aux roues dont les abscisses sont l' et l'', seront connues.

Les équations (75) destinées aux vérifications numériques deviennent de la même manière

$$\left.\begin{aligned}
\mu\rho\sin\varepsilon+\mu\rho_1\sin\varepsilon_1+\Sigma\mu'\rho'\sin\varepsilon'+\Sigma\mu'\rho'_1\sin\varepsilon'_1 &= -k'\sin 2(\theta+\theta')\cos\Theta\\
\mu\rho\cos\varepsilon-\mu\rho_1\cos\varepsilon_1+\Sigma\mu'\rho'\cos\varepsilon'-\Sigma\mu'\rho'_1\cos\varepsilon'_1 &= -k'\sin 2(\theta+\theta')\sin\Theta
\end{aligned}\right\}\quad(89)$$

Il ne sera pas sans intérêt de présenter la remarque suivante concernant l'emploi des équations (88). Le sens des x positifs pour lequel nous avons pris celui du mouvement de la machine, est arbitraire, puisqu'on peut toujours supposer à ce mouvement un sens contraire à celui que l'on aura choisi d'abord. Il faut donc que les équations (88) assignent les mêmes masses et les mêmes positions absolues aux contrepoids montés sur les mêmes roues, lorsque l'on applique les équations en partant d'un sens du mouvement opposé au sens primitif. Il est facile de vérifier qu'il en sera effectivement ainsi; en effet, cette inversion aura pour résultat de changer les ρ, ε, ε' en ρ_1, $-\varepsilon_1$ et $-\varepsilon'_1$; l'inclinaison θ des cylindres se changera en $\pi-\theta$; et, comme l'angle θ' est

censé affecté du double signe, l'angle $\theta+\theta'$ peut toujours se changer en $\pi-(\theta+\theta')$. Les quantités μ, U, $\frac{V}{\lambda}$, k' et Θ conserveront d'ailleurs les mêmes valeurs. Or, il est facile de vérifier qu'en effectuant ces changements dans la 1re et la 2e équation (88), on retombera sur la 3e et la 4e, et réciproquement.

Nous allons maintenant nous occuper des équations de condition (54). Ces équations, au nombre de deux seulement, sont destinées à faire disparaître les principales inégalités dans l'équation (y), qui est celle des moments autour de l'axe horizontal perpendiculaire à la voie. Elles répondent au mouvement de *galop*. (Les équations (53) comprennent bien quatre équations relatives à des inégalités du même genre; mais nous avons déjà fait remarquer qu'elles ne se rapportent qu'au poids des pièces et à la variation de vitesse, en sorte que les équations (54) peuvent être considérées comme les principales équations de condition relatives à la destruction de la tendance au mouvement de *galop*.)

Multiplions la 1re équation (54) par $\cos\theta$, et la 2e par $\sin\theta$, puis ajoutons; d'autre part, multiplions la 1re par $\sin\theta$, et la 2e par $\cos\theta$, puis retranchons la 1re de la 2e; il viendra, en vertu de $\varepsilon=\varepsilon+\theta$, $\varepsilon_1=\varepsilon_1+\theta$ [voir (45)],

$$\left.\begin{aligned} w_0(\cos\theta+\sin\theta)-w_1-\Sigma\mu\rho l\sin\varepsilon-\Sigma\mu\rho_1 l\cos\varepsilon_1=0\\ w_0(\cos\theta-\sin\theta)-w_1-\Sigma\mu\rho l\cos\varepsilon+\Sigma\mu\rho_1 l\sin\varepsilon_1=0\end{aligned}\right\}\quad(90)$$

Cette substitution de l'angle ε à l'angle ε ne suffit pas; il convient de séparer ici, comme nous l'avons fait plus haut, les termes qui se rapportent aux roues dont l'abscisse est l, en posant

$$\Sigma\mu\rho l\frac{\sin}{\cos}\varepsilon=\mu\rho l\frac{\sin}{\cos}\varepsilon+\Sigma\mu'\rho' l'\frac{\sin}{\cos}\varepsilon',$$

et de même pour les sommes qui contiennent l'indice 1, et cela afin d'éliminer les termes en l. Il vient de la sorte

$$w_0(\cos\theta+\sin\theta)-w_1-\mu_1\rho l\sin\varepsilon-\mu\rho_1 l\cos\varepsilon_1-\Sigma\mu'\rho' l'\sin\varepsilon'-\Sigma_1\mu'\rho'_1 l'\cos\varepsilon'_1=0,$$
$$w_0(\cos\theta-\sin\theta)-w_1-\mu_1\rho l\cos\varepsilon+\mu\rho_1 l\sin\varepsilon_1-\Sigma\mu'\rho' l'\cos\varepsilon'+\Sigma_1\mu'\rho'_1 l'\sin\varepsilon'_1=0.$$

Ajoutons la 1re et la 4e équation (88), puis retranchons la 3e

de la 2e; il viendra, en ayant égard aux relations (78) qui sont encore vraies lorsqu'on y change θ' en $\theta+\theta'$, et aux équations (79),

$$\mu\rho\sin\varepsilon+\mu\rho_1\cos\varepsilon_1+\Sigma\mu'\rho'\sin\varepsilon'+\Sigma\mu'\rho'_1\cos\varepsilon'_1=-U-k\frac{r}{B}\sin(\theta+\theta')[\cos(\theta+\theta')-\sin(\theta+\theta')]$$

$$\mu\rho\cos\varepsilon-\mu\rho_1\sin\varepsilon_1+\Sigma\mu'\rho'\cos\varepsilon'-\Sigma\mu'\rho'_1\sin\varepsilon'_1=-U+k\frac{r}{B}\sin(\theta+\theta')[\cos(\theta+\theta')+\sin(\theta+\theta')]$$

Multiplions maintenant ces deux équations par l, et ajoutons-les respectivement à la 1re et la 2e des précédentes, nous aurons

$$\omega_0(\cos\theta+\sin\theta)-\omega_1-\Sigma\mu'\rho'(l'-l)\sin\varepsilon'-\Sigma\mu'\rho'_1(l'-l)\cos\varepsilon'_1=-Ul-k\frac{r}{B}l\sin(\theta+\theta')[\cos(\theta+\theta')-\sin(\theta+\theta')]$$

$$\omega_0(\cos\theta-\sin\theta)-\omega_1-\Sigma\mu'\rho'(l'-l)\cos\varepsilon'+\Sigma\mu'\rho'_1(l'-l)\sin\varepsilon'_1=-Ul+k\frac{r}{B}l\sin(\theta+\theta')[\cos(\theta+\theta')+\sin(\theta+\theta')]$$

Ces équations ne contiennent plus les inconnues $\mu\rho$, ε, ni $\mu\rho_1$, ε_1, qui se rapportent aux contrepoids de la roue dont l'abscisse est l. Les inconnues sont au nombre de deux pour chaque contrepoids : si les six roues sont accouplées, les inconnues que renferment nos deux équations sont au nombre de huit; si deux paires de roues seulement sont accouplées, il reste encore quatre inconnues. On peut donc, dans les deux cas, y satisfaire d'une infinité de manières différentes. Nous profiterons de cette indétermination pour introduire une simplification, qui consistera à faire

$$\mu'\rho'_1=\mu'\rho', \qquad \varepsilon'_1=\varepsilon'; \tag{92}$$

de sorte que les contrepoids appliqués à deux roues montées sur le même essieu, autre que celui dont l'abscisse est l, seront identiques et disposés de même par rapport aux manivelles situées du même côté. Il n'en résultera aucune impossibilité physique de satisfaire aux équations (88), puisque leurs racines $\mu\rho\sin\varepsilon$, $\mu\rho\cos\varepsilon$, $\mu\rho_1\sin\varepsilon_1$ et $\mu\rho_1\cos\varepsilon_1$, seront toujours des quantités réelles, ces équations étant du premier degré; et que les va-

leurs $\mu\rho$, $\mu\rho_1$ pourront toujours être prises positivement moyennant un choix convenable des angles ε et ε_1.

Les conditions (92) étant introduites dans les équations (91), on en tirera par soustraction et addition, puis transposant,

$$\left.\begin{aligned}\Sigma\mu'\rho'(l'-l)\sin\varepsilon' &= \omega_0\sin\theta + l.k\frac{r}{B}\sin(\theta+\theta')\cos(\theta+\theta')\\ \Sigma\mu'\rho'(l'-l)\cos\varepsilon' &= \omega_0\cos\theta - \omega_1 + l.[U - k\frac{r}{B}\sin^2(\theta+\theta')]\end{aligned}\right\} \quad (93)$$

Telles sont les équations qu'il s'agissait d'obtenir. Les termes en l qu'elles renferment aux seconds membres disparaîtront partout ailleurs que dans les machines employées au chemin de fer du Nord, dont nous avons parlé en commençant; car on pourra toujours faire $l=0$ en prenant pour abscisse l, l'abscisse de l'axe de l'essieu moteur principal, lequel coïncide avec l'origine des coordonnées.

La remarque que nous avons présentée à l'occasion des équations (88) se reproduit à l'égard des équations (93); seulement les indices 1 ayant disparu, ces équations doivent donner les mêmes valeurs de $\mu'\rho'$, et des valeurs égales et de signe contraire des angles ε', lorsque l'on intervertit le sens primitif de l'axe des x; de sorte que, dans les deux cas, il en résulte pour chaque roue un même contrepoids occupant une situation identique. Lorsque le sens primitif est interverti, les abscisses l, l' et l'', changent de signe, ainsi que ω_1; les angles θ et $\theta+\theta'$ se changent en $\pi-\theta$ et $\pi-(\theta+\theta')$ comme ci-dessus, tandis que U, ω_0 et $k\frac{r}{B}$ conservent leurs signes. Il est facile de voir que ces changements opérés dans les équations (93) n'ont pour résultat que de changer les signes des ε', comme cela doit être.

Les équations (93) serviront au calcul des contrepoids autres que ceux des roues motrices principales; puis les équations (88), simplifiées par les conditions (92), fourniront les éléments des contrepoids des roues motrices principales elles-mêmes. La solution générale du problème de la détermination des contrepoids fournie par ces équations serait complète, s'il ne restait

à fixer convenablement la valeur de l'indéterminée θ', et la limite du décroissement de la fonction k, faute de pouvoir annuler cette dernière.

26. Les équations (93) suffiront, dans les machines à quatre roues accouplées, pour calculer les éléments des contrepoids identiques des deux roues portées sur l'essieu dont l'abscisse est l', au moyen de cette abscisse et des quantités ω_0 et ω_1. Dans le cas des six roues accouplées, il faudra joindre à ces équations deux conditions arbitraires, sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

S'il s'agit de machines à roues indépendantes, les masses μ' et μ'' seront nulles, ainsi que l'abscisse l de l'essieu moteur; d'un autre côté, la fonction ω_1 (48) sera également nulle, parce qu'elle se réduit aux termes relatifs à la manivelle principale et à son bouton, et que l'abscisse L''', qui leur est commune, est égale à zéro. Les deux équations (93) se réduisent alors à l'équation de condition unique

$$\omega_0 = 0.$$

Pour interpréter cette condition et préciser en même temps la fonction ω_0 (48), nous la mettrons sous la forme

$$\omega_0 = \frac{r}{B}\frac{B_0}{\cos\varphi}[M'B'^2 + M'I'^2 - M'B'B].$$

En vertu d'un théorème connu sur les moments d'inertie, la quantité $M'B'^2 + M'I'^2$ est égale au moment d'inertie de la bielle par rapport à un axe perpendiculaire au plan du mouvement et passant par le point d'articulation de la bielle et de la tête du piston. Soit B'' la longueur du pendule simple qui accomplit ses oscillations dans le même temps que la bielle autour de cet axe, on aura

$$B'' = \frac{M'B'^2 + M'I'^2}{M'B'};$$

T désignant la durée des oscillations simples de ce pendule, B'' se détermine en fonction de T, par la formule

$$B'' = g\left(\frac{T}{\pi}\right)^2, \qquad (94)$$

et la valeur de w_0 deviendra

$$w_0 = \frac{r}{B}\frac{B_0}{\cos\varphi} M'B'(B''-B), \qquad (95)$$

expression dans laquelle le facteur $\frac{B_0}{\cos\varphi}$ peut être remplacé par sa valeur très approchée $\frac{1}{\sqrt{\cos\varphi}}$.

La condition $w_0 = 0$ se traduit donc simplement par

$$B'' = B, \qquad (96)$$

c'est-à-dire que la longueur du pendule simple équivalent à la bielle devrait être égale à la longueur de celle-ci. En d'autres termes, les points où l'axe de la bielle coupe les axes du bouton de la manivelle et de la tête du piston doivent être des centres d'oscillation ou de percussion réciproques. Cette condition peut être remplie au moyen de formes très diverses données à la bielle ; mais on ne parvient à aucune forme admissible dans la pratique sans prolonger cetorgane. Dans le cas idéal où la bielle se réduirait à une simple ligne droite sans dimensions transversales, on sait que le centre d'oscillation serait situé aux deux tiers de sa longueur. Il faudrait donc, pour le faire coïncider avec le bouton de la manivelle, prolonger cette bielle idéale de moitié.

Nous allons faire voir que la condition $w_0 = 0$ est incompatible avec la condition $k = 0$ (63), sans laquelle il est impossible de détruire simultanément les tendances aux mouvements de *tangage*, de *lacet*, aux *oscillations normales* et au mouvement de *roulis*. En effet, la condition $w_0 = 0$ donne

$$M'I'^2 - M'B'(B - B') = 0,$$

l'autre condition est

$$M''B + M'(B - B') = 0,$$

et ne peut être satisfaite que par une valeur positive de B' ; multipliant cette équation par B' et ajoutant à la précédente,

il vient

$$M'l'^2+M''BB'=0,$$

condition incompatible avec une valeur positive de B'.

L'incompatibilité que nous rencontrons ici est la seule que présente la question de la stabilité des machines locomotives envisagée au point de vue purement théorique. En supposant possible de satisfaire pratiquement à la condition $k=0$, on se trouverait obligé, dans le cas des machines à roues indépendantes, de décider laquelle de celle-ci ou de $\varphi_0=0$ doit être sacrifiée à l'autre, ou mieux quelle serait la manière la plus avantageuse de déroger à toutes deux à la fois. D'après les motifs exposés plus haut, on devrait encore recourir à l'expérience.

Il est toutefois digne de remarque que ces deux conditions conduisent l'une et l'autre à prolonger la bielle; et l'on peut voir que, si l'on applique sur le plongement dela bielle, du côté de la manivelle, des masses successivement croissantes en un point donné, ou des masses constantes à des distances variables, on arrivera à obtenir le résultat $\varphi_0=0$ avant que la fonction k ne s'annule; en sorte que la première condition satisfaite peut être considérée comme un acheminement vers la seconde.

Ces considérations nous amènent tout naturellement à dire ici quelques mots des recherches auxquelles nous nous sommes livré à l'égard des inconvénients que peuvent, en général, entraîner les deux conditions dont il s'agit.

DES AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU PROLONGEMENT DE LA BIELLE A UN POINT DE VUE AUTRE QUE CELUI DE LA STABILITÉ.

27. Notre théorie de la stabilité suppose une rigidité des pièces toujours suffisante, et ne tient aucun compte de l'action des ressorts de suspension. On conçoit que la rigidité soit réalisable à la rigueur, et que les mouvements du bâtis soient maintenus dans des limites données, par un serrage assez puis-

sant des ressorts de suspension ; mais la rigidité et le serrage ont des limites qu'on ne saurait dépasser. D'un autre côté, en supposant que par un fort serrage on puisse rendre insignifiantes les oscillations des glissières, celles-ci n'en seraient pas moins soumises à des pressions qui pourraient croître énormément avec la vitesse, et donner lieu à un travail de frottement et à une détérioration des diverses pièces de la machine, dont il est impossible de faire abstraction. Les boutons de manivelle devraient pouvoir aussi résister à des efforts considérables.

Ce nouveau point de vue m'a conduit à examiner particulièrement l'effet du mouvement de la bielle et du piston sur les glissières et le bouton de la manivelle. Dans cette recherche, j'ai dû admettre, sauf vérification ultérieure, que les dimensions des pièces présentaient une résistance suffisante, et laisser de côté le travail du frottement dans l'articulation de la bielle et de la tête du piston, comme sans importance vis-à-vis de celui des glissières.

Le système formé par la bielle et le piston, indépendamment des poids de ces deux organes et de la pression de la vapeur, est soumis à des forces extérieures qui sont : 1° l'action du bouton de la manivelle sur la bielle ; 2° l'action des glissières ; 3° les actions moins facilement déterminables exercées sur la tige du piston par le collet du cylindre, et celles que le cylindre lui-même exerce sur le piston. J'ai omis ces dernières comme peu importantes dans la question qui nous occupe. En appliquant à ce système les équations du mouvement de translation parallèlement et perpendiculairement à l'axe du cylindre, et l'équation des moments autour d'un axe perpendiculaire au plan du mouvement, en tout trois équations, nous avons pu déterminer la valeur de la pression produite par les glissières et les deux composantes de l'action exercée par le bouton de la manivelle. Voici maintenant ce qui ressort des résultats obtenus.

La pression de la vapeur transmise par le piston donne lieu à une action normale aux glissières, et toujours de même sens,

lorsque les tiroirs n'ont pas d'avance. Le poids de la bielle et du piston donne aussi lieu à des composantes normales aux glissières dans les cylindres inclinés, et à des composantes tangentielles qui se combinent avec le frottement des glissières. Ces diverses composantes pourraient être appelées composantes statiques, en ce sens que ce sont celles que l'on obtiendrait en les calculant comme si la bielle et le piston étaient au repos. Mais le mouvement de la bielle et du piston produisent en outre des actions normales aux glissières, qui varient avec la position de la manivelle, la vitesse angulaire et la variation de cette vitesse par unité de temps.

Les termes principaux des expressions analytiques des composantes normales aux glissières sont proportionnels au carré de la vitesse, et au nombre de deux. Le premier, et le plus important, a pour facteur la fonction ω_0; sa période est un tour de la roue motrice, en sorte qu'il augmente et diminue alternativement la pression statique. Le second terme a pour facteur la fonction k, et la période de son action est d'un demi-tour de la roue motrice; il augmente et diminue deux fois alternativement la pression due à la composante statique et au précédent terme, et pour cette raison devient moins important à considérer.

Si le sens de l'action de la vapeur sur les glissières n'était pas sensiblement constant, il y aurait quelque intérêt à disposer de la masse de la bielle de manière que le terme en $\omega\omega_0$ fût constamment de signe contraire à la pression statique de la vapeur transmise aux glissières. Mais il n'en est pas ainsi. Il convient donc d'annuler le facteur ω_0.

Quant au terme en k, il serait convenable aussi, mais moins important, de l'annuler, au point de vue de l'action normale transmise aux glissières. Or nous avons vu, n° 26, que les conditions $\omega_0 = 0$ et $k = 0$ sont incompatibles, et qu'en satisfaisant à la première, qui est d'ailleurs exigée dans les machines à roues indépendantes, pour détruire la tendance au mouvement de *galop*, par un prolongement de la bielle du côté de la manivelle, on est cependant moins éloigné de satisfaire à la seconde

qu'avec la forme actuelle des bielles. Si l'on fait $w_0 = 0$ dans les machines à roues accouplées, les termes provenant de la bielle dans les équations de condition relatives au mouvement de *galop* seront détruits; et il n'y aura à équilibrer sous ce rapport que les masses des bielles et manivelles d'accouplement, au moyen de contrepoids appliqués aux roues autres que les roues motrices principales.

Il y a donc incontestablement avantage à faire $w_0 = 0$, c'est-à-dire à prolonger la bielle en sorte que la longueur du pendule simple équivalent soit égale à longueur B, l'orsqu'on se propose de diminuer les variations des actions que la tête du piston transmet aux glissières et les oscillations qui en sont la conséquence.

Maintenant, il reste à savoir quelle pourra être l'influence de la condition $w_0 = 0$ sur les pressions auxquelles est soumis le bouton de la manivelle. J'ai calculé à cet effet la valeur maximum de ces pressions dans la machine citée n° 24, pour une vitesse de 4 tours par seconde; d'un autre côté, substituant au poids 77^k de la bielle un poids de 125^k, à cause du prolongement, et supposant $\frac{B'}{B} = 0{,}6$, puis faisant $B'' = B$ pour satisfaire à l'équation $w_0 = 0$, j'ai calculé de même la pression maximum exercée sur le bouton de la manivelle, avec la vitesse de 4 tours par seconde, et le résultat, comparé au précédent, s'est trouvé être une augmentation de pression tout à fait insignifiante. En sorte qu'il n'y aurait pas nécessité dans ce cas de renforcer le bouton de la manivelle, et que le travail du frottement sur ce bouton ne serait que faiblement augmenté.

Après avoir examiné les principales conséquences de la condition $w_0 = 0$, je n'aurai que peu de mots à dire de celles qu'entraînerait la condition $k = 0$. Les pressions sur les glissières et le bouton de la manivelle deviendraient énormes pour les grandes vitesses, et nécessiteraient un grand accroissement de la résistance des pièces, en produisant un travail de frottement considérable. Ces inconvénients, qui tiennent à la grandeur des

masses, ne peuvent être atténués que par une réduction de certaines parties des masses en mouvement. Ce serait le cas d'examiner s'il n'y aurait pas lieu de construire en acier le piston et ses accessoires, puis la partie de la bielle comprise entre le bouton de la manivelle et la tête du piston, le prolongement de la bielle pouvant être construit en fer. Tous les inconvénients inhérents à la difficulté d'annuler k se trouveraient notablement réduits.

De l'ensemble de ce qui vient d'être exposé il résulte évidemment que le prolongement de la bielle peut être avantageusement pratiqué jusqu'au point où l'équation $\omega_0 = 0$ (*) est satisfaite, et qu'il est nécessaire d'examiner jusqu'où ce prolongement pourrait s'étendre utilement au-delà, dans le but de diminuer la valeur de k. L'expérience doit être consultée à cet égard.

ÉQUATIONS DE TRANSLATION ET DE ROTATION, EN AYANT ÉGARD AUX ÉQUATIONS DE CONDITION RELATIVES A LA DÉTERMINATION DES CONTREPOIDS.

28. Nous avons trouvé, n° 23, que, les équations (74) étant supposées satisfaites, les quatre angles Φ, Φ', Ψ et Ψ' acquièrent une valeur commune égale à $\theta + \theta' - \frac{\pi}{4}$, alors que les coefficients C, C', D, D', se réduisent aux expressions (85). D'un autre côté, les équations (90), ou leurs équivalentes (93), qui sont relatives au mouvement de *galop*, étant pareillement satis-

(*) On pourrait encore se proposer d'annuler ω_0 dans le cas des machines à cylindres intérieurs, où la bielle ne peut pas être prolongée, au moyen d'une masse additionnelle fixée à la bielle près du bouton de la manivelle, ou même ayant son centre de gravité en ce point; mais je n'ai pas examiné l'influence de cette masse relativement au frottement qu'elle produirait sur le bouton. Si cette disposition était impraticable, et si, d'ailleurs, le mode d'application des contrepoids qui résulte de notre théorie présentait des avantages marqués dans la pratique, on serait conduit à préférer les machines à cylindres extérieurs, qui se prêtent sans difficulté à des modifications plus ou moins considérables de la forme de la bielle.

faites, annulent la valeur de J, équations (54). Nous allons substituer ces diverses valeurs dans les équations du n° 20, en remplaçant, pour plus de simplicité, dans celles-ci, les termes du 2e ordre par leurs valeurs (59) (*), et négligeant les termes des ordres supérieurs. Le résultat de ces substitutions est :

Équation $[x]$,

$$F+F_1=Q+Q'+\left(\frac{d\rho}{dt}-g\sin g'\right)\Sigma M$$
$$-2k\sin\varphi\sin\theta'\sin\left(\alpha_1'+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$-2k\sin\varphi\sin\theta'\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

Équation $[y]$,

$$G+G'+G''=0$$

Équation $[z]$,

$$-(H+H'+H'')-(H_1+H'_1+H''_1)=-g\cos g'\Sigma M$$
$$+2k\sin\varphi\cos\theta'\sin\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+2k\sin\varphi\cos\theta'\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

Équation (z),

$$Gl+G'l'+G''l''-(F-F_1)E=-2k\sin\varphi\sin\theta'A\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+2k\sin\varphi\sin\theta'A\sin\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+0,040\,4077.kA\cos\theta\sin2\alpha\,\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+0,080\,8154.kA\cos\theta\cos2\alpha\,\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

(*) Il ne faut pas perdre de vue que ces valeurs sont calculées pour les machines dans lesquelles on a $\frac{r}{B}=\frac{1}{5}$. Dans le cas où $\frac{r}{B}$ en différerait notablement, il faudrait calculer les coefficients des premiers termes des séries par les formules données dans la note du n° 13.

Équation (x),

$$(H_1+H'_1+H''_1)E-(H+H'+H'')E=$$
$$-2k\sin\varphi\cos\theta' A\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+2k\sin\varphi\cos\theta' A\sin\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$
$$+0{,}040\,4077.kA\sin\theta\sin 2\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$+0{,}080\,8154.kA\sin\theta\cos 2\alpha\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

Équation (y),

$$(F+F_1)R+(H+H_1)l+(H'+H'_1)l'+(H''+H''_1)l''=$$
$$Qq+Q'q'+g\Gamma_0\Sigma M-2S\frac{d^2\alpha}{dt^2}+2S'\frac{d\nu}{dt}$$
$$+2k\sin\varphi\left[g\sin(g'+\theta')-\cos\theta'\frac{d\nu}{dt}\right]\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)$$
$$-0{,}007\,1978\,\omega_0^2\sin\left(3\alpha+\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2}$$
$$-0{,}021\,5934\,\omega_0^2\cos\left(3\alpha+\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2}\quad(*)$$

Ces équations donnent les valeurs des inégalités qui subsistent dans les locomotives armées de contrepoids calculés suivant les formules (74) et (93) en fonction de l'indéterminée θ'. Or, avons-nous dit, la quantité θ' doit être considérée comme affectée du signe $\pm$. Il est facile de voir actuellement le résultat du changement de signe de cette indéterminée. En effet, les termes où entre θ' ont pour facteurs des fonctions de l'une ou de l'autre forme

$$\sin\theta'\begin{matrix}\sin\\\cos\end{matrix}\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right),\qquad \cos\theta'\begin{matrix}\sin\\\cos\end{matrix}\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right):$$

(*) Pour appliquer ces équations aux machines équilibrées en suivant les règles de M. Lechatelier, il faudrait y faire $\theta'=0$ ou π, et rétablir dans l'équation (y) les termes

$$+J\cos(\alpha+\sigma)\frac{d^2\alpha}{dt^2}-J\sin(\alpha+\sigma)\frac{d\alpha^2}{dt^2}$$

qui sont devenus nuls avec notre système de contrepoids. Les valeurs de J et σ sont données par les équations (54).

le changement de θ' en $-\theta'$ a pour résultat de changer le signe du facteur $\sin\theta'$, tandis que la valeur absolue du coefficient reste la même; et de changer la valeur de α pour laquelle le terme correspondant acquiert une valeur donnée. Quant au terme en $\cos\theta'$, la valeur α qui répond à la valeur donnée est seule modifiée.

Il en résulte que deux systèmes de contrepoids calculés au moyen de valeurs égales et de signes contraires de l'indéterminée θ' peuvent être considérés comme présentant un même degré de stabilité, et que la différence de leur action ne se manifeste que par la différence des positions des manivelles auxquelles répondent les actions perturbatrices de même intensité. Ce ne serait donc que dans des considérations étrangères à celles que nous fournit l'examen des équations précédentes, que l'on pourrait puiser des motifs de préférence entre deux valeurs égales et de signes contraires de θ'.

Les équations [x], etc., se prêtent à quelques combinaisons intéressantes.

Eliminons $F+F_1$ entre la première et la dernière, nous aurons, à cause de $\frac{d^2\alpha}{dt^2}=\frac{1}{R}\frac{dv}{dt}$, dans l'hypothèse où il n'y a pas de glissement,

$$\left.\begin{aligned}
&(H+H_1)l+(H'+H'_1)l'+(H''+H''_1)l''= \\
&\quad Q(q-R)+Q'(q'-R)+g(\Gamma_0+R\sin g')\Sigma M \\
&\quad +2\left(S'-\frac{S}{R}-R\frac{\Sigma M}{2}\right)\frac{dv}{dt} \\
&\quad +2k\sin\varphi\left[g\sin(g'+\theta')-\cos\theta'\frac{dv}{dt}\right]\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right) \\
&\quad +2k\sin^2\varphi\sin\theta' R\sin\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\
&\quad +2k\sin\varphi\sin\theta' R\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2} \\
&\quad -0{,}007\,1978\,w_0\sin\left(3\alpha+\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\
&\quad -0{,}021\,5934\,w_0\cos\left(3\alpha+\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2}
\end{aligned}\right\}\quad(97)$$

Les équations [z] et (x), en divisant la 2^e par E, vont nous donner aisément les sommes séparées des réactions normales à la voie, qui se produisent sur les roues situées d'un côté et de l'autre du plan méridien. Posons, pour plus de commodité,

$$\operatorname{tang} \upsilon = \frac{E}{A}; \tag{98}$$

l'on trouvera aisément

$$\left.\begin{aligned} H+H'+H'' = {} & g\cos g' \frac{\Sigma M}{2} \\ & + k\sin\varphi \frac{\cos\theta'}{\sin\upsilon}\cos\left(\alpha+\theta+\theta'+\upsilon-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\ & - k\sin\varphi \frac{\cos\theta'}{\sin\upsilon}\sin\left(\alpha+\theta+\theta'+\upsilon-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2} \\ & - 0{,}020\,2038\,k\,\frac{\sin\theta}{\operatorname{tang}\upsilon}\sin 2\alpha\,\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\ & - 0{,}040\,4077\,k\,\frac{\sin\theta}{\operatorname{tang}\upsilon}\cos 2\alpha\,\frac{d\alpha^2}{dt^2} \end{aligned}\right\} \tag{99}$$

$$\left.\begin{aligned} H_1+H'_1+H''_1 = {} & g\cos g' \frac{\Sigma M}{2} \\ & - k\sin\varphi \frac{\cos\theta'}{\sin\upsilon}\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\upsilon-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\ & + k\sin\varphi \frac{\cos\theta'}{\sin\upsilon}\sin\left(\alpha+\theta+\theta'-\upsilon-\frac{\pi}{4}\right)\frac{d\alpha^2}{dt^2} \\ & + 0{,}020\,2038\,k\,\frac{\sin\theta}{\operatorname{tang}\upsilon}\sin 2\alpha\,\frac{d^2\alpha}{dt^2} \\ & + 0{,}040\,4077\,k\,\frac{\sin\theta}{\operatorname{tang}\upsilon}\cos 2\alpha\,\frac{d\alpha^2}{dt^2} \end{aligned}\right\} \tag{100}$$

29. Ces équations et les précédentes contiennent encore d'autres termes variables que les termes en k et υ.

Nous trouvons dans l'équation [x] la force de traction Q et le terme $\frac{dv}{dt}\Sigma M$. Les variations de ces termes ne peuvent disparaître que par l'emploi d'appareils de distribution de vapeur capables de maintenir la vitesse de rotation constante pour toute position de la manivelle.

La quantité Q se trouve multipliée par q dans l'équation (y); d'où il suit que, pour éviter l'effet de ses variations dans le mouvement de *galop*, il faudrait que la barre d'attelage, dont q est l'ordonnée, fût placée à la hauteur des essieux des roues motrices.

L'équation (y) contient encore deux termes variables, l'un en S, l'autre en S', qui nous ont fourni déjà l'équation de condition (52)

$$RS'-S=0.$$

Pour l'interpréter, il suffit d'observer, en remontant aux équations (49 *bis*), que les pièces tournantes dont les moments d'inertie entrent dans la valeur de S sont une faible partie de la masse M_f des pièces fixes. Considérant l'ordonnée N_f du centre de gravité de M_f comme inconnue, l'équation précédente fournirait évidemment une valeur positive et très petite de N_f. Il faudrait donc, pour annuler l'influence de la masse des pièces fixes et des moments d'inertie des pièces tournantes, dans le mouvement de *galop*, que le centre de gravité des pièces fixes, ou le centre de gravité général, fût placé un peu au dessous du plan parallèle à la voie, qui passe par l'essieu moteur.

On arrive à des conséquences très différentes en posant d'autres conditions que permet d'établir l'équation (97). Cette dernière et les équations (99) et (100) sont les seules qui renferment les forces H, sans contenir les forces F ou G.

Les deux dernières équations ne renferment pas Q; cette quantité se trouve seulement dans l'équation (97) affectée du facteur $q-R$. Il s'ensuit que la condition relative à l'invariabilité des actions normales au plan de la voie qui peuvent provenir de la variation de l'effort de traction est $q=R$; ce qui signifie que la barre d'attelage devrait être attachée au niveau des rails. Enfin cette même équation donne, pour condition de l'invariabilité des mêmes actions provenant de la variation de la vitesse, cette autre équation

$$S'-\frac{S}{R}-R\Sigma\frac{M}{2}=0.$$

On en tire, en vertu des équations (49 *bis*), et observant que $\frac{1}{2}\Sigma M$ est un peu plus grand que M_f, cette conséquence, que le centre de gravité des pièces fixes devrait être un peu au dessous du niveau des rails.

Une pareille situation du centre de gravité est plus impossible encore que la précédente, et l'on voit qu'il n'y a d'autre moyen d'éliminer l'influence de la hauteur du centre de gravité que de faire disparaître les variations de la vitesse.

Les deux conditions que nous avons trouvées pour la hauteur du point d'attache de la barre d'attelage ne sont pas plus concordantes. Cependant l'équation (97) peut nous offrir d'utiles renseignements. Au lieu de chercher à rendre les réactions H indépendantes de la charge remorquée, il peut y avoir, au contraire, de l'intérêt à faire croître les pressions H avec la charge Q, afin que l'adhérence qui leur est proportionnelle croisse en même temps.

L'abscisse l est nulle ailleurs que dans les machines du chemin du Nord déjà citées. Laissons de côté ces machines pour le moment. Le premier membre de (97) se réduit alors à deux termes. Dans le cas de machines accouplées dont les cylindres sont à l'arrière, les abscisses l' et l'' étant positives, il est visible que les pressions exercées sur les roues correspondantes croîtront avec la valeur algébrique du facteur q—R.

Dans les machines où les roues motrices principales sont au milieu, l'une des abscises l' et l'' est négative, l'autre est positive, et ces deux quantités sont à peu près égales d'ailleurs. Admettons, pour fixer les idées, que l' se rapporte aux roues d'arrière et l'' aux roues d'avant, le premier membre de l'équation (97) sera à peu près proportionnel à l'excès des pressions des roues d'avant sur les pressions des roues d'arrière : cette différence diminue donc, ou bien les roues d'avant sont soulagées relativement aux roues d'arrière, lorsque q diminue ou que l'on élève le point d'attache. C'est, d'ailleurs, ce que l'on aperçoit aisément sans calcul. Pourtant il est bon de remarquer que, la quantité q étant toujours plus petite que R et

produisant par cela même un accroissement de pression sur les roues d'arrière proportionnel à Q ou à la charge remorquée, il paraîtrait à cet égard préférable, lorsque l'on ne veut accoupler que deux paires de roues, d'accoupler celles d'arrière plutôt que celles d'avant.

Dans ces divers cas, il est visible qu'on se réserverait un moyen d'augmenter l'adhérence dans des circonstances assez graves, comme celles où, fortuitement, un fort courant d'air opposé au sens du mouvement ou une grande humidité des rails empêcheraient un train d'avancer, en disposant le mode d'attelage de manière à faire varier à volonté la hauteur du point d'attache de la barre (*).

30. Enfin l'équation (97) peut servir à déterminer la position du centre de gravité d'une locomotive équilibrée. En supposant cette machine placée sur une bascule, on aura la mesure des forces H; et l'équation (97), en y faisant Q et Q′ nuls, ainsi que la pente g', puis la vitesse et sa première dérivée, donnera

$$(H+H_1)l+(H'+H'_1)l'+(H''+H''_1)l''=g\,\Gamma_0\Sigma M+2gk\sin\varphi\sin\theta'\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right).$$

Or il est évident que le deuxième membre de cette équation est égal au moment du poids total $g\Sigma M$ de la locomotive autour de l'axe des y. La quantité Γ_0, dans laquelle on a fait $g'=0$, peut donc être considérée comme l'abscisse moyenne du centre de gravité de la locomotive : l'abscisse variable du centre de gravité s'obtiendrait donc en ajoutant à Γ_0 la quantité

$$\frac{2k}{\Sigma M}\sin\varphi\sin\theta'\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right),$$

(*) Nous avons admis dans nos équations que la force Q était horizontale. Les conséquences que nous venons de présenter ne sont rigoureuses que dans cette hypothèse : il serait donc convenable d'examiner les limites de l'obliquité que l'on pourrait admettre sans inconvénients dans la pratique; mais cette discussion ne peut trouver place dans ce mémoire.

qui serait nulle dans les machines équilibrées suivant les règles de M. Lechatelier, attendu qu'elles rentrent dans nos formules (74) lorsqu'on y fait $\theta'=0$.

On parviendra à cette expression d'une autre manière, en observant que ΣMx a pour facteur $g\cos g'$ dans l'équation (20) désignée depuis par (y), et recherchant l'ensemble des termes en $g\cos g'$ dans l'équation (y) du n° 20, à l'aide des équations (49 *bis*).

Si l'on se propose de déterminer le mouvement du centre de gravité perpendiculairement au plan de la voie, on observera que son ordonnée est $\frac{\Sigma Mz}{\Sigma M}$; or, d'après l'équation (20), qui est désignée plus loin par (y), la quantité ΣMz est le facteur de $\left(\frac{dv}{dt}-g\sin g'\right)$ dans ces équations. Il vient donc d'après les équations (y), n° 20, et (49 *bis*),

$$\Sigma Mz=+2[M_fN_f+\Sigma M^vN^v]-2(M''a+A_0k\cos\varphi)\sin\theta \\ -C'\cos(\alpha+\Phi'),$$

ou, en vertu de (84) et (85),

$$\frac{\Sigma Mz}{\Sigma M}=2\frac{M_fN_f+\Sigma M^vN^v}{\Sigma M}-2\frac{M''a+A_0k\cos\varphi}{\Sigma M}\sin\theta \\ -\frac{2k}{\Sigma M}\sin\varphi\cos\theta'\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right).$$

Les deux premiers termes du 2e membre de cette équation donnent l'ordonnée moyenne du centre de gravité, et le 3e est la valeur qu'il faut joindre à cette ordonnée moyenne pour avoir l'ordonnée vraie de ce même point. En faisant $\theta'=0$, on aura pour amplitude de l'excursion du centre de gravité perpendiculairement au plan de la voie, dans les machines équilibrées suivant les règles de M. Lechatelier, le double de la quantité

$$\frac{2k}{\Sigma M}\sin\varphi.$$

Soient z_G, x_G, les coordonnées du centre de gravité rap-

portées à des axes passant par sa position moyenne : on aura, aux quantités près du 4e ordre,

$$\left.\begin{aligned} z_G &= -\frac{2k}{\Sigma M}\sin\varphi\cos\theta'\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right) \\ x_G &= +\frac{2k}{\Sigma M}\sin\varphi\sin\theta'\cos\left(\alpha+\theta+\theta'-\frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}\right\} (101)$$

d'où par division,

$$\frac{z_G}{x} = -\cot\theta' ;$$

équation qui est celle d'une ligne droite.

On voit donc que, dans les machines équilibrées conformément aux équations (74), le centre de gravité décrit, dans son mouvement relatif, une ligne droite qui fait avec l'axe des x un angle égal à $\frac{\pi}{2}+\theta'$, mesuré dans le sens du mouvement de la manivelle motrice ; et que les systèmes de contrepoids caractérisés par des valeurs égales et de signes contraires de θ' donnent lieu à deux trajectoires rectilignes du centre de gravité, qui sont symétriques par rapport à une droite parallèle à l'axe des z et passant par la position moyenne de ce centre de gravité. Les équations (101) montrent d'ailleurs que cette ligne se réduirait à un point ; et que, par suite, le centre de gravité n'aurait aucun mouvement relatif, si la quantité k pouvait être rendue nulle.

Notons que ces résultats, obtenus en négligeant les quantités du 4e ordre, deviendront rigoureux dans le cas où la somme des angles θ et θ' serait égale à un multiple impair de l'angle droit ; la trajectoire du centre de gravité serait alors parallèle aux axes des cylindres. Ce qui vient d'être dit précise nettement la signification mécanique de l'indéterminée θ'.

31. Les équations (99) et (100), qui donnent les valeurs séparées des sommes des réactions normales pour les roues situées d'un côté et de l'autre du plan méridien, seront utilement employées pour déterminer une limite inférieure des

réactions normales H auxquelles une roue en particulier soit exposée dans une machine équilibrée. En effet, cette moindre valeur sera égale à la moyenne des valeurs maximum des trois quantités H, H′, H″, pour un côté, et H_1, H'_1, H''_1, pour l'autre côté. Cette moyenne se composera, dans les deux cas, du sixième de la composante normale du poids de la machine, augmenté, si l'on n'a égard qu'aux termes principaux, de la quantité

$$\frac{1}{3} k \sin\varphi \frac{\cos\theta'}{\sin\upsilon} \frac{d\alpha^2}{dt^2} \quad (*)$$

dans laquelle nous supposons k positif, d'après la construction actuelle des locomotives; et le rapport $\frac{\cos\theta'}{\sin\upsilon}$ également positif. (Cette hypothèse est toujours possible, puisque, l'angle υ n'étant donné que par sa tangente (98), on pourra le prendre tel que son sinus ait le signe de $\cos\theta'$.)

Observons toutefois que ces valeurs maximum n'ont pas lieu simultanément : du côté des y positifs, le maximum a lieu pour la valeur de α, qui satisfait à la relation

$$\alpha + \theta + \theta' + \upsilon - \frac{\pi}{4} = -\frac{\pi}{2};$$

du côté des y négatifs le maximum a lieu lorsque l'on a

$$\alpha + \theta + \theta' - \upsilon - \frac{\pi}{4} = +\frac{\pi}{2}.$$

On peut se proposer de rechercher quels sont les points des

(*) Si l'on calcule la valeur de cette expression au moyen des données du n° 24, complétées par les suivantes $r = 0^m,28$, $B = 1^m,375$, $A = 0^m,944$, $E = 0^m,75$, $\theta' = 0$, et que l'on désigne par n le nombre de tours par seconde, on trouvera

$$\frac{1}{3} k \sin\varphi \frac{\cos\theta'}{\sin\upsilon} \frac{d\alpha^2}{dt^2} = 61,7.n^2 \text{ kil.};$$

ce qui donne 987 kil. pour 4 tours par seconde : ainsi, la moindre variation de charge à laquelle l'une des roues se trouve exposée à chaque tour s'élève à près de 1000 kilogrammes. Tel est le résultat auquel conduit l'emploi des règles de M. Lechatelier.

circonférences des roues en contact avec les rails aux instants où la somme des réactions normales est un maximum. Soient, pour le côté des y positifs, ϖ l'angle du rayon passant par le point de contact avec la manivelle motrice, mesuré dans le sens de α; et pour le côté des y négatifs, ϖ_1 l'angle correspondant au point de contact, mesuré à partir de la manivelle située de ce côté et dans le même sens que α. On aura, dans le premier cas,

$$\alpha - \theta + \varpi = \frac{\pi}{2},$$

et dans le second

$$\alpha - \theta + \varpi_1 = 0.$$

De ces équations, jointes aux précédentes, on tire

$$\left.\begin{aligned} \varpi &= 2\theta + \theta' + \upsilon + 3\frac{\pi}{4}, \\ \varpi_1 &= 2\theta + \theta' - \upsilon - 3\frac{\pi}{4}. \end{aligned}\right\} \quad (102)$$

(υ étant pris de manière que son sinus ait le signe de $\cos\theta'$).

Il paraît assez admissible que dans les machines munies de contrepoids calculés pour faire disparaître les tendances au mouvement de *galop*, les points où se produiraient les pressions maximum seraient sensiblement placés de la même manière, par rapport aux manivelles, pour les trois roues situées d'un même côté. On peut présumer aussi que, dans les machines où la tendance au mouvement de *galop* n'est pas détruite par des contrepoids convenablement calculés, les roues du milieu doivent à peu près échapper aux effets de cette tendance. S'il en était réellement ainsi, l'application des équations (102) aux roues du milieu faciliterait l'étude de l'influence des réactions normales au plan de la voie relativement à l'usé local des bandages des roues motrices. En effet, lorsque les contrepoids sont calculés en attribuant à θ' la valeur zéro, il ne subsiste de tendances aux glissements dans le sens de la voie et dans le sens transversal que celles qui proviennent des variations de

vitesse, et d'autres qui sont représentées par des termes du deuxième ordre dans l'équation (z) relative au mouvement de *lacet*. Or la variation de vitesse provenant du mode de distribution de la vapeur est une quantité périodique : en un tour de roue elle présente deux maximum et deux minimum ; il en est de même des termes de deuxième ordre. Si donc l'usé local des bandages pouvait être attribué à ces deux causes, il devrait se manifester par quatre plats sur la circonférence des roues motrices, qui se confondraient en deux si les maxima des deux actions que nous considérons coïncidaient : dans ce cas, les deux plats seraient situés aux extrémités d'un même diamètre et différeraient peu de profondeur, la matière de la roue étant d'ailleurs supposée homogène. Mais il paraît que le plus souvent il ne se produit qu'un seul plat assez profond sur chaque roue. On est donc conduit à attribuer cette dégradation à d'autres causes que les variations de vitesse ou aux termes de deuxième ordre dans les machines dont il s'agit.

Si, au contraire, on doit les attribuer aux variations des réactions normales H, la situation des plats ou flaches devra coïncider à peu près avec les points des circonférences des roues motrices du milieu, que déterminent les valeurs de ϖ et ϖ_1 (102) (*). Nous livrons cet aperçu à l'appréciation des ingénieurs de chemins de fer, et particulièrement des ingénieurs du chemin du Nord, qui ont entrepris de relever avec soin

(*) L'application des formules (102) aux machines équilibrées d'après les règles de M. Lechatelier exige une précaution particulière. Nous avons dit que nos équations (74) coïncident avec les règles de M. Lechatelier dans le cas des cylindres horizontaux lorsqu'on y fait $\theta' = 0$ ou π. Mais comme cet ingénieur n'a point indiqué les règles à suivre dans le cas des cylindres inclinés, il est possible que l'on ait déterminé les contrepoids dans tous les cas comme s'il s'agissait de cylindres horizontaux. Dans cette hypothèse, il faudra faire $\theta' = -\theta$ ou $\pi - \theta$, en choisissant celle de ces deux valeurs qui rend $\cos\theta'$ positif, afin que υ puisse toujours être un angle aigu positif. En effet, les formules de M. Lechatelier reviennent à nos équations (74), dans lesquelles on supprimerait les termes en k'. Or cette suppression équivaut à $\theta + \theta' = 0$ ou π. Il faudrait donc alors remplacer les valeurs de ϖ et ϖ_1 par

les profils des roues de leurs locomotives, lorsqu'elles rentrent dans les ateliers après un service prolongé.

PROPOSITION SUBSIDIAIRE DEVANT SERVIR A RÉGLER LA DISTRIBUTION DES CONTREPOIDS ET LE MODE D'ACCOUPLEMENT DES ROUES MOTRICES DANS LES CAS INDÉTERMINÉS.

32. Les équations (93), qui sont au nombre de deux seulement, contiennent encore les quatre inconnues $\mu'\rho'\sin\varepsilon'$, $\mu'\rho'\cos\varepsilon'$; $\mu''\rho''\sin\varepsilon''$, $\mu''\rho''\cos\varepsilon''$. Une considération fort importante dans la pratique nous fournira un moyen de lever l'indétermination. — Les masses des contrepoids peuvent devenir assez considérables pour que l'on ait de la peine à les loger dans les intervalles compris entre les rayons des roues. Il convient donc de faire en sorte que la somme des masses soit aussi petite que possible. Pour ne pas accumuler les difficultés analytiques, nous substituerons à cette condition celle du minimum de la somme des quantités $\mu\rho$, $\mu'\rho'$, etc. Les 2e et 4e équations (88) vont nous faire connaître les circonstances favorables à ce résultat. En les ajoutant, et ayant égard aux équations (92), il vient

$$\mu\rho\cos\varepsilon+\mu\rho_1\cos\varepsilon_1+2\Sigma\mu'\rho'\cos\varepsilon'=-\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+2k'\cos\Theta\sin^2(\theta+\theta'),$$

---

les suivantes, qui supposent les cylindres placés à l'avant,

$$\varpi=\theta+\upsilon+3\frac{\pi}{4},$$

$$\varpi_1=\theta-\upsilon-3\frac{\pi}{4}.$$

Dans les machines où les cylindres sont à l'arrière, à cause que θ est voisin de 180°, on aurait, en faisant $\theta'=\alpha-\theta$,

$$\varpi=\theta+\upsilon-\frac{\pi}{4},$$

$$\varpi_1=\theta-\upsilon+\frac{\pi}{4}.$$

On peut remarquer que, θ' n'étant plus nul ou égal à π, les machines dont il s'agit conservent, à cause de l'inclinaison des cylindres, des tendances aux mouvements de *tangage* et de *lacet*.

ou, en vertu de la 2e équation (71),

$$\mu\rho\cos\varepsilon+\mu\rho_1\cos\varepsilon_1+2\Sigma\mu'\rho'\cos\varepsilon'=-\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+k\frac{r}{B}\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right)\sin^2(\theta+\theta'). \quad (103)$$

Le premier membre de cette équation est la somme des produits de la forme $\mu\rho\cos\varepsilon$ étendue à l'ensemble des contrepoids. Nous allons faire voir que la valeur de cette somme pourra généralement être considérée comme négative dans les machines actuelles où k est toujours positif.

Le second terme du 2e membre étant positif et le facteur $\sin^2(\theta+\theta')<1$, il suffit d'établir que la fonction

$$-\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+k\frac{r}{B}\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right)$$

peut être regardée comme généralement négative.

D'une part les équations (59) et (48) donnent

$$U+\frac{V}{\lambda}=(M'r+M''r)\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right)+\Sigma\pm M'''C'''\left(1+\frac{\Lambda'''}{\lambda}\right),$$

D'un autre côté, on a par l'équation (49),

$$k\frac{r}{B}\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right)=(M'r+M''r)\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right)-M'r\frac{B'}{B}\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right),$$

il s'ensuit

$$-\left(U+\frac{V}{\lambda}\right)+k\frac{r}{B}\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right)=-M'r\frac{B'}{B}\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right)-\Sigma\pm M'''C'''\left(1+\frac{\Lambda'''}{\lambda}\right). \quad (104)$$

Il est clair que cette expression sera négative toutes les fois que les quantités sous le signe Σ devront être prises avec le signe $+$; c'est ce qui a lieu pour les machines à cylindres extérieurs, où les rayons C''' sont toujours de même sens que les manivelles principales, et que l'on accouple plus particulièrement. Dans les machines à cylindres intérieurs, les manivelles et bielles d'accouplement sont disposées de manière que les rayons des cercles décrits par leurs centres de gravité soient de sens opposés aux rayons des manivelles motrices; il en résulte des termes négatifs sous le signe Σ, ou positifs dans l'ex-

pression (104); en sorte que l'on ne peut prévoir *à priori* si cette expression restera négative. Mais en observant que le terme relatif à la manivelle principale détruira, sous le signe Σ, une certaine partie des termes négatifs, et comparant les termes restants à la quantité

$$-M'r\frac{B'}{B}\left(1+\frac{\Lambda}{\lambda}\right),$$

il nous paraît hors de doute que l'expression (104) ne reste négative. Au surplus, nous pourrions subordonner nos déductions à la vérification *à posteriori* du signe négatif de la somme des quantités $\mu\rho\cos\varepsilon$. Nous admettrons donc que, dans tous les cas possibles, cette somme, étendue à l'ensemble des contrepoids, est une quantité constamment négative.

Voici maintenant la conséquence à tirer de ce résultat : la somme des produits de la forme $\mu\rho\cos\varepsilon$ étant égale à une quantité négative donnée, tandis que les facteurs $\mu\rho$,... sont essentiellement positifs, il suit que, pour rendre un minimum la somme des quantités $\mu\rho$, il faut faire en sorte, autant que possible, que tous les cosinus des angles ε soient négatifs et peu différents de la limite —1; puis, dans le cas où quelques uns des termes $\mu\rho\cos\varepsilon$ se trouveraient être inévitablement positifs, chercher à les rendre aussi petits que possible.

Le raisonnement qui précède ne pourrait pas être appliqué à la somme des quantités $\mu\rho\sin\varepsilon$, attendu que, d'après la 1re et la 3e équation (88), cette somme est égale à un produit dont l'un des facteurs $\sin 2(\theta+\theta')$ est de signe indéterminé.

A l'aide de la proposition que nous venons d'établir, il nous sera facile de discuter les circonstances que présente l'application des contrepoids aux machines locomotives; mais, pour faciliter cette discussion et les applications que l'on pourra se proposer de faire dans la suite, il nous paraît indispensable de résumer les notations que nous avons employées dans la théorie des contrepoids et les diverses équations qui ressortent finament de cette théorie.

RÉSUMÉ
DES
FORMULES GÉNÉRALES
RELATIVES A L'ÉTABLISSEMENT DES CONTREPOIDS.

—

Notations.

33. *Sens des abscisses positives, et origine des coordonnées.* — Pour fixer les idées, concevons que la locomotive s'avance dans un sens déterminé, mais cependant entièrement arbitraire. Les abscisses positives seront comptées dans le sens du mouvement de translation et à partir du milieu de la droite qui joint les centres des cercles décrits par les extrémités des bielles motrices. Dans toutes les machines, excepté celles employées au chemin du Nord, dont il a été question plusieurs fois, cette origine des coordonnées coïncidera avec le milieu de l'axe de l'essieu moteur principal.

Sens de l'inclinaison des axes des cylindres. — L'inclinaison est l'angle formé par l'axe des abscisses avec l'axe du piston, mesuré dans le sens des abscisses positives aux abscisses négatives, en passant par le zénith ; en sorte que cette inclinaison sera de 180° pour les cylindres horizontaux placés à l'arrière [voir fig. (1) et (3)].

θ désigne l'inclinaison ainsi définie.

Manivelle principale.

r rayon de la manivelle principale.

Bielle.

M' masse de la bielle ;

B longueur de la bielle ou distance des axes du bouton de la manivelle et de la tête du piston ;

B' distance du centre de gravité de la bielle à l'axe commun de la tête du piston et de la bielle, comptée de cet axe vers le bouton de la manivelle ;

B'' distance du centre de percussion relatif à l'axe commun de la tête du piston et de la bielle, ou longueur du pendule

simple qui accomplit ses très petites oscillations autour de cet axe dans le même temps que la bielle ;

T durée des petites oscillations de la bielle autour de l'axe de la tête du piston.

Piston.

M'' masse du piston ;

A distance de l'axe du piston au plan méridien, ou demi-écartement des axes des cylindres.

Manivelles, principale ou d'accouplement ; boutons de manivelle ; bielles d'accouplement. — Ces pièces sont supposées symétriques par rapport au plan parallèle au plan méridien qui passe par leur centre de gravité ; s'il en était autrement, il faudrait les décomposer en parties distinctes qui satisfassent à cette condition :

M''' masse de l'une quelconque de ces pièces ou parties distinctes d'une même pièce ;

C''' rayon du cercle décrit par son centre de gravité ;

L''' abscisse du centre de ce cercle ;

A''' distance du centre de gravité au plan méridien.

Contrepoids des roues motrices principales.

Notations communes aux deux roues :

μ masse d'un contrepoids ;

l abscisse de l'axe de l'essieu moteur principal, quantité qui sera nulle dans toutes les machines, excepté celles du chemin du Nord rappelées plus haut ;

λ distance du plan du centre de gravité des contrepoids au plan méridien, valeur commune aux contrepoids portés sur toutes les roues.

Notations particulières :

1°. Contrepoids de la roue située du côté de la manivelle qui est le moins avancée dans le sens du mouvement de rotation ;

ρ distance du centre de gravité du contrepoids à l'axe de l'essieu ;

ε angle du rayon qui aboutit à ce centre de gravité, avec le rayon de la manivelle principale située du même côté,

mesuré dans le sens du mouvement de rotation ;

2°. Contrepoids de la roue située du côté de la manivelle qui est le plus avancée dans le sens du mouvement de rotation ;

ρ_1 rayon aboutissant au centre de gravité du contrepoids ;

ε_1 angle de ce rayon avec la manivelle située du même côté.

Contrepoids des roues portées par l'un des deux autres essieux.

Notations communes aux deux contrepoids :

μ' masse du contrepoids ;

ρ' rayon ;

ε' angle de ρ' avec la manivelle située du même côté ;

l' abscisse de l'essieu.

Contrepoids de l'autre paire de roues. — Mêmes notations que les précédentes, avec deux accents au lieu d'un seul.

Indéterminée θ'.

θ' angle qui jouit de la propriété de faire disparaître les tendances aux mouvements de *tangage* et de *lacet*, lorsqu'on lui donne la valeur o ou $\pm\pi$, et de détruire les tendances aux *oscillations normales* au plan de la voie et au mouvement de *roulis* quand on le fait égal à $\pm\frac{\pi}{2}$.

En négligeant les termes du 4ᵉ ordre, on trouve que le mouvement relatif du centre de gravité d'une locomotive munie de contrepoids calculés suivant nos formules est rectiligne. L'angle θ' se trouve être l'angle que fait la trajectoire rectiligne de ce centre de gravité avec le côté inférieur de la perpendiculaire au plan de la voie, mesuré de ce côté vers l'arrière.

Deux systèmes de contrepoids calculés avec des valeurs égales et de signes contraires de θ' présentent le même degré de stabilité ; il n'y a de différence entre eux que les positions du système pour lesquelles des actions pertubatrices de même intensité se développent.

A défaut d'expériences qui fixent la valeur la plus convenable de cette indéterminée dans chaque cas donné, il paraîtrait préférable de lui attribuer une valeur entre $\pm 30°$ et $\pm 45°$, plutôt que de la prendre égale à zéro. Cet angle serait indifférent si l'on pouvait rendre nulle la quantité k ci-dessous.

Valeurs auxiliaires.

π rapport de la circonférence au diamètre, ou 180 degrés sexagésimaux sous les signes sin et cos;

g accélération produite par la pesanteur par unité de temps;

$$\sin\varphi = \frac{r}{B\sqrt{2}}, \qquad (a)$$

l'angle φ doit être pris entre zéro et $+\frac{\pi}{2}$, c'est l'angle aigu de la bielle et de l'axe du piston, pour un angle de la manivelle avec cet axe, égal à $\frac{\pi}{4}$ ou $3\frac{\pi}{4}$; dans le cas de $\frac{r}{B} = \frac{1}{5}$, on a $\varphi = 8°7'48''$, $\log\sin\varphi = 9{,}150\,515$.

$$\operatorname{tang}\Theta = \frac{\lambda - A}{\lambda + A}, \qquad (b)$$

l'ambiguïté de l'angle Θ est indifférente.

$$k = M'(B - B') + M''B, \qquad (c)$$

$$k' = k\,\frac{\sin\varphi}{\sin\left(\Theta + \frac{\pi}{4}\right)}, \qquad (d)$$

$$\left.\begin{aligned} U &= M'r + M''r + \Sigma \pm M'''C''', \\ V &= (M'r + M''r)A + \Sigma \pm M'''C'''A'''. \end{aligned}\right\} \qquad (e)$$

Dans ces deux formules et l'une des suivantes, les sommes Σ s'étendent à toutes les masses M''' situées d'un côté seulement du plan méridien, et les signes $+$ ou $-$ doivent être employés suivant que le rayon C''' est de même sens que le rayon r de la manivelle située du même côté, ou de sens opposé.

$$\left.\begin{aligned} B'' &= g\left(\frac{T}{\pi}\right)^2, \\ w_0 &= M'r\,\frac{B'}{B}\,\frac{B_0}{\cos\varphi}\,(B'' - B). \end{aligned}\right\} \qquad (f)$$

La quantité $\frac{B_0}{\cos\varphi}$ peut être remplacée par sa valeur très approchée $\frac{1}{\sqrt{\cos\varphi}}$; dans le cas où $\frac{r}{B} = \frac{1}{5}$, on a $\frac{B_0}{\cos\varphi} = 1{,}005\,077$.

$$w_1 = \Sigma \pm M'''C'''L'''. \qquad (g)$$

Formules générales.

Les formules suivantes, qui sont relatives au mouvement de *galop*, suffiront au calcul des contrepoids de masses μ' dans le cas de quatre roues couplées seulement; autrement il faudra joindre deux relations arbitraires à ces équations :

$$\left.\begin{aligned}
&\mu'\rho'(l'-l)\sin\varepsilon' + \mu''\rho''(l''-l)\sin\varepsilon'' = \omega_0 \sin\theta + l.k\frac{r}{B}\sin(\theta+\theta')\cos(\theta+\theta')\\
&\mu'\rho'(l'-l)\cos\varepsilon' + \mu''\rho''(l''-l)\cos\varepsilon'' = \omega_0\cos\theta - \omega_1 + l\left(U - k\frac{r}{B}\sin^2(\theta+\theta')\right)
\end{aligned}\right\} (h)$$

Nous avons dit que le plus généralement l sera nul, ce qui apportera des simplifications.

Les éléments des deux contrepoids des roues motrices principales s'obtiendront ensuite par les formules

$$\left.\begin{aligned}
\mu\rho\sin\varepsilon &= -(\mu'\rho'\sin\varepsilon' + \mu''\rho''\sin\varepsilon'') - \frac{1}{2}\left(U - \frac{V}{\lambda}\right) - k'\sin(\theta+\theta')\cos(\theta+\theta'+\Theta)\\
\mu\rho\cos\varepsilon &= -(\mu'\rho'\cos\varepsilon' + \mu''\rho''\cos\varepsilon'') - \frac{1}{2}\left(U + \frac{V}{\lambda}\right) + k'\sin(\theta+\theta')\sin(\theta+\theta'+\Theta)
\end{aligned}\right\} (i)$$

$$\left.\begin{aligned}
\mu\rho_1\sin\varepsilon_1 &= -(\mu'\rho'\sin\varepsilon' + \mu''\rho''\sin\varepsilon'') + \frac{1}{2}\left(U - \frac{V}{\lambda}\right) - k'\sin(\theta+\theta')\cos(\theta+\theta'-\Theta)\\
\mu\rho_1\cos\varepsilon_1 &= -(\mu'\rho'\cos\varepsilon' + \mu''\rho''\cos\varepsilon'') - \frac{1}{2}\left(U + \frac{V}{\lambda}\right) + k'\sin(\theta+\theta')\sin(\theta+\theta'-\Theta)
\end{aligned}\right\} (j)$$

et les calculs pourront être vérifiés par les relations

$$\left.\begin{aligned}
\mu\rho\sin\varepsilon + \mu\rho_1\sin\varepsilon_1 &= -k'\sin 2(\theta+\theta')\cos\Theta - 2(\mu'\rho'\sin\varepsilon' + \mu''\rho''\sin\varepsilon'')\\
\mu\rho\cos\varepsilon - \mu\rho_1\cos\varepsilon_1 &= -k'\sin 2(\theta+\theta')\sin\Theta.
\end{aligned}\right\} (k)$$

Disons un mot de la résolution des équations (h), (i), (j). Si le nombre des roues accouplées était de quatre seulement, l'une des quantités μ'' ou μ' serait nulle, et en divisant les équations (h) par $l'-l$ ou $l''-l$, les premiers membres prendraient la forme de ceux des équations (i) ou (j). Dans le cas où les six roues seront accouplées, on pourra toujours en pratique disposer de deux relations arbitraires pour ramener les premiers membres des équations (h) à cette forme. La résolution des équations (i) s'effectuera en divisant la première par la seconde, ce qui donnera la valeur de tang ε; d'où l'angle ε lui-même, avec

une ambiguïté que l'on fera disparaître par la considération que, $\mu\rho$ étant essentiellement positif, ε devra être pris de manière que son sinus et son cosinus aient respectivement les signes des seconds membres des équations (i). L'une ou l'autre de ces équations donnera ensuite $\mu\rho$ en divisant par $\sin\varepsilon$ ou $\cos\varepsilon$. Les équations (j) feront connaître de même ε_1 et $\mu\rho_1$. Quant aux valeurs séparées de μ, ρ et ρ_1, elles se déduiront de la considération de l'espace disponible entre les rayons des roues ; toutefois, en ce qui concerne les roues motrices principales, il ne suffira pas que les produits $\mu\rho$ et $\mu\rho_1$ satisfassent aux équations précédentes, il faudra encore disposer des distances ρ et ρ_1 de manière que les valeurs de μ soient égales (*).

Enfin, nous ferons remarquer que, B'' tenant lieu du moment d'inertie de la bielle, les équations précédentes sont homogènes par rapport aux masses, et que dès lors on y peut remplacer les masses par les poids ; on peut également y remplacer les distances Λ, Λ''' et λ, au plan méridien, par le double de ces quantités ou les distances qui séparent les plans qui contiennent les centres de gravité des organes correspondants dans les deux machines dont se compose la locomotive.

(*) Si l'on ne suppose pas les masses μ des contrepoids appartenant à un même essieu assujetties à être égales, l'une étant μ, l'autre μ_1, on trouve que $\Sigma my'$ étendu à toutes les masses de la locomotive n'est plus nul ; et le deuxième membre de l'équation (18) devrait alors être augmenté de $\left(g\sin\varphi' - \frac{dv}{dt}\right)\Sigma my'$, ou, en ayant égard aux notations du tableau du n° 15, de $\left(g\sin\varphi' - \frac{dv}{dt}\right)(\mu_2-\mu_1)\lambda$, quantité variable avec $\frac{dv}{dt}$, mais très petite.

Le deuxième terme de l'équation (19) devrait, par la même raison, être augmenté de $-g\cos\varphi'(\mu-\mu_1)\lambda$, quantité constante.

Donc, en négligeant les variations de $\frac{dv}{dt}(\mu-\mu_1)\lambda$ dans le mouvement de *lacet*, et se rappelant que $\mu\rho_1$ entre dans toutes nos équations comme une quantité unique, on pourra écrire $\mu_1\rho_1$ à la place de $\mu\rho_1$, et disposer arbitrairement du rapport de μ et de μ_1 pour faciliter l'application des contrepoids.

Si μ et μ_1 sont inégaux, le mouvement du centre de gravité général, au lieu de se faire dans le plan méridien, aura lieu dans un plan parallèle à celui-ci et sera le même du reste.

DÉTERMINATION DES CONTREPOIDS DANS LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE MACHINES LOCOMOTIVES.

34. Nous laisserons de côté dans ces applications les machines du chemin de fer du Nord, où l est différent de zéro. Pour les autres machines, les termes en l disparaîtront des seconds membres des équations (h), et les abscisses seront comptées de l'axe de l'essieu moteur principal. A l'aide des données particulières à chaque machine, on pourra dans tous les cas effectuer le calcul des quantités *auxiliaires* du n° précédent à l'aide des mêmes équations (a), (b)..., (f), (g).

La résolution des équations (h) fera le principal objet de la discussion. L'emploi des équations (i) et (j) nécessitera l'adoption d'une valeur de l'indéterminé θ' ; or, avons-nous dit, l'expérience seule peut prononcer à l'égard du choix de cette quantité. Cependant, lorsqu'on entreprendra d'expérimenter, il sera nécessaire de faire l'application de nos formules : nous procéderons donc comme si θ' était une quantité donnée.

Machines à six roues accouplées.

Machines dont les cylindres sont à l'arrière. La quantité w_0 est généralement négative avec la forme que l'on donne actuellement aux bielles des machines locomotives, et la valeur absolue de cette fonction est d'autant plus petite [2e équation (f)] que la masse de la bielle est plus accumulée autour du bouton de la manivelle. D'après nos conventions relatives à l'inclinaison, θ est peu différent de 180°, ce qui rend $\cos\theta$ négatif, et par suite positif le produit $w_0\cos\theta$, avec la forme ordinaire des bielles. Les machines dont il s'agit étant à cylindres extérieurs, les rayons C''' sont de même sens que le rayon de la manivelle principale; les abscisses L''' sont d'ailleurs toutes positives : il s'ensuit que la fonction w_1 est nécessairement positive. Le signe de la quantité $w_0\cos\theta - w_1$ ne saurait donc être généralement prévu que dans le cas où la forme de la bielle satisferait à la condition $w_0 = 0$.

Il se présente un cas remarquable, c'est celui où les cylindres étant horizontaux, on pourra disposer des masses des manivelles et des bielles d'accouplement de manière que l'on ait $w_1 = -w_0$. Dans ce cas, on aura la faculté de ne point appliquer de contrepoids aux quatre roues de devant, car, l étant nul, les équations (h) seront satisfaites en y faisant $\mu' = 0$, $\mu'' = 0$. On y pourrait satisfaire d'autres manières; mais le 2e membre de la 2e équation (h) étant nul, et les facteurs de $\cos\varepsilon'$ et $\cos\varepsilon''$ étant positifs dans les premiers membres, il faudrait que l'un de ces cosinus fût positif, ce qui est défavorable à la réduction de la somme des quantités $\mu\rho$, d'après notre énoncé du n° 32.

1° Soit $$w_0 \cos\theta - w_1 > 0.$$

On pourrait joindre aux deux équations (h) des conditions telles que celles-ci :

$$\mu'\rho' \sin\varepsilon' = \mu''\rho'' \sin\varepsilon'', \quad \mu'\rho' \cos\varepsilon' = \mu''\rho'' \cos\varepsilon''; \quad (105)$$

et les équations (h) deviendraient

$$\left.\begin{aligned} (l' + l'')\mu'\rho' \sin\varepsilon' &= w_0 \sin\theta, \\ (l' + l'')\mu'\rho' \cos\varepsilon' &= w_0 \cos\theta - w_1. \end{aligned}\right\} \quad (106)$$

Les contrepoids des 4 roues autres que les roues motrices principales seraient identiques. Les abscisses l' et l'' étant positives, ainsi que le 2e membre de la 2e équation, il s'ensuit que $\cos\varepsilon'$ sera positif, circonstance défavorable à la diminution de la somme des quantités $\mu\rho$. L'angle θ étant voisin de deux droits, $\sin\varepsilon'$ sera très petit, et $\cos\varepsilon'$ voisin de l'unité : d'où il suit que la somme des quatre quantités $\mu'\rho'$ serait sensiblement égale à

$$\frac{4}{l' + l''}(w_0 \cos\theta - w_1).$$

Mais on réduira la somme des masses des contrepoids si l'on supprime ceux des roues du milieu, se bornant à en adapter aux roues de devant et d'arrière. Supposons que l'', $\mu''\rho''$ et ε'' se rapportent aux roues d'avant; en faisant $\mu' = 0$ il viendra :

$$\left.\begin{aligned} l''\mu''\rho'' \sin\varepsilon'' &= w_0 \sin\theta, \\ l''\mu''\rho'' \cos\varepsilon'' &= w_0 \cos\theta - w_1. \end{aligned}\right\} (107)$$

et la somme des deux quantités $\mu''\rho''$ sera sensiblement

$$\frac{2}{l''}(w_0\cos\theta - w_1),$$

quantité moindre que la précédente à cause de $l' < l''$.

Il conviendra donc dans ce cas de ne point adapter de contrepoids aux roues du milieu, et de calculer ceux des roues d'avant par les formules (107).

Les contrepoids des roues d'arrière se calculeront ensuite par les formules (*i*) et (*j*) en y faisant $\mu' = 0$.

2° Soit $w_0\cos\theta - w_1 < 0$.

(Cette circonstance aurait lieu nécessairement si l'on prolongeait la bielle de manière à avoir $w_0 = 0$.)

Le 2e membre de la 2e équation (*h*) étant négatif, les deux cosinus pourront être négatifs ; et, si l'on veut profiter de cette circonstance pour diminuer la masse des contrepoids des roues d'arrière, il y aura avantage à conserver des contrepoids aux roues du milieu, et simplicité à employer les équations (105) et (106). Les contrepoids des roues d'arrière dépendront des équations (*i*) et (*j*), dans lesquelles on remplacera

$$\mu'\rho'\frac{\sin}{\cos}\varepsilon' + \mu''\rho''\frac{\sin}{\cos}\varepsilon'' \quad \text{par} \quad 2\mu'\rho'\frac{\sin}{\cos}\varepsilon'.$$

3° Soit $w_0\cos\theta - w_1 = 0$.

En faisant les deux hypothèses qui conduisent aux équations (106) et (107), on voit que les angles ε' et ε'' seraient égaux à $\pm\frac{\pi}{2}$, et que les contrepoids ainsi déterminés n'auraient aucune influence sur la somme des quantités $\mu\rho\cos\varepsilon$ étendue à l'ensemble des contrepoids ; or il y a de l'avantage à réduire la somme $\mu'\rho' + \mu''\rho''$. On y parviendra en supprimant les contrepoids des roues du milieu et faisant usage des équations (107), puis achevant le calcul au moyen des équations (*i*) et (*j*), privées de leurs termes en μ'.

Roues motrices principales au milieu, cylindres à l'avant.—Dans l'état actuel des choses w_0 est négatif ; mais ici $\cos\theta$ est positif,

ce qui rend négatif le terme $w_0 \cos\theta$. Quant à w_1, les abscisses L''' relatives aux bielles d'accouplement, étant de signes contraires si l'on a affaire à deux bielles distinctes, donneront lieu à des termes qui se détruiront à peu près, et à un résultat voisin d'être nul s'il n'existe qu'une seule bielle équivalente; les termes relatifs aux manivelles donneront des résultats variables, suivant que les machines seront à cylindres intérieurs ou extérieurs, en sorte qu'on ne saurait fixer généralement le signe de $w_0 \cos\theta - w_1$.

1° Soit $\qquad w_0 \cos\theta - w_1 > 0.$

Les abscisses l' et l'' étant de signes contraires, et presque égales d'ailleurs, il est visible qu'il sera avantageux de supprimer les contrepoids des roues d'avant. En convenant que l', μ', ρ' et ε', se rapportent aux roues d'arrière, il est évident que $\cos\varepsilon'$ deviendra négatif, résultat important à obtenir. On aura donc pour calculer ces quantités :

$$\left.\begin{aligned} l'\mu'\rho' \sin\varepsilon' &= w_0 \sin\theta, \\ l'\mu'\rho' \cos\varepsilon' &= w_0 \cos\theta - w_1; \end{aligned}\right\} \quad (108)$$

et les contre-poids du milieu se tireront des équations (i) et (j), dans lesquelles on fera $\mu'' = 0$.

2° Soit $\qquad w_0 \cos\theta - w_1 < 0.$

On sera conduit dans ce cas à supprimer les contrepoids des roues d'arrière, et l'on se servira des équations (107) pour calculer les éléments des contrepoids des roues d'avant. Les équations (i) et (j), en y faisant $\mu' = 0$, feront connaître les contrepoids des roues motrices principales.

3° Soit $\qquad w_0 \cos\theta - w_1 = 0.$

Dans cette circonstance on peut à volonté choisir l'une ou l'autre des deux solutions précédentes, ce qui est évident ; les contre poids de masses μ ou μ'' seront d'ailleurs très faibles, à cause que $\sin\theta$ est une faible fraction.

Machines à quatre roues accouplées.

35. ***Roues motrices principales à l'arrière.*** — Il est clair qu'il ne peut être question que de l'accouplement avec les roues du milieu. Les quantités l', μ', ρ', ε', se rapportant à ces roues, les équations (h) deviendront

$$\left.\begin{aligned} l'\mu'\rho'\sin\varepsilon' &= \omega_0\sin\theta, \\ l'\mu'\rho'\cos\varepsilon' &= \omega_0\cos\theta - \omega_1. \end{aligned}\right\} \quad (109)$$

et l'on en tirera ε' et $\mu'\rho'$. Ce mode d'accouplement ne sera avantageux, au point de vue de la réduction des masses des contrepoids, que si la fonction $\omega_0\cos\theta - \omega_1$ se trouve être négative; dans le cas contraire on serait obligé d'admettre une valeur positive de $\cos\varepsilon'$, ce qui nécessiterait un accroissement des masses des contrepoids des roues motrices principales. Quoi qu'il en arrive, les équations (i) et (j), en y faisant $\mu'' = 0$, serviront à déterminer ces derniers.

Roues motrices principales au milieu. — Les abscisses l' et l'' sont de signes contraires : nous emploierons les accents $'$ pour les roues d'arrière, et les accents $''$ pour les roues d'avant.

1° ***Accouplement à l'arrière.*** — On fera usage des formules (108); et l'on observera que $\cos\varepsilon'$ ne sera négatif qu'autant que l'on aura $\omega_0\cos\theta - \omega_1 > 0$; dans le cas contraire ce mode d'accouplement serait désavantageux.

2° ***Accouplement à l'avant.*** — On se servira des formules (107), qui ne donneront $\cos\varepsilon''$ négatif que si l'on a $\omega_0\cos\theta - \omega_1 < 0$.

Il s'ensuit qu'en l'absence de motifs étrangers qui conduisent à préférer l'un des deux modes d'accouplement à l'autre, il faudrait accoupler les roues à l'arrière ou à l'avant, suivant que la fonction correspondante $\omega_0\cos\theta - \omega_1$ est positive ou négative (*).

(*) Je profiterai de la circonstance pour justifier une assertion que j'ai émise devant la Société des ingénieurs civils. C'est que, si l'on ne se préoccupe

Les équations (*i*) et (*j*), en y supprimant les termes affectés de μ'' dans le premier cas, et de μ' dans le second, feront connaître les éléments des contrepoids des roues motrices principales.

Machines à roues indépendantes.

36. Dans ces machines, le seul terme que contienne la somme $\Sigma \pm M'''C'''L'''$ est relatif à la manivelle principale; mais ce terme est nul, attendu que l'abscisse correspondante L''' est égale à zéro : on a donc $w_1 = 0$. Les masses μ' et μ'' étant nulles aussi, les équations (*h*) n'admettent d'autre solution que

$$w_0 = 0, \qquad (110)$$

laquelle se réduit en vertu de la 2e équation (*f*) à

$$B'' = B. \qquad (111)$$

Nous avons déjà dit que cette condition ne peut être avantageusement remplie que par un prolongement de la bielle différent de celuî qu'exigerait la condition $k = 0$, relative à la destruction simultanée des tendances aux mouvements de *tangage*, *lacet*, *oscillations normales* et *mouvement de roulis*. Il faut donc renoncer, dans les machines à roues indépendantes, à détruire les tendances au mouvement de *galop*, si l'on ne consent pas à prolonger la bielle de manière à satisfaire à l'équation (111), et, dans tous les cas, renoncer à faire disparaître simultanément les tendances aux divers mouvements qu'on peut redouter dans une machine locomotive. La facilité qu'offrent les machines

---

que du mouvement de *galop*, et que l'on suppose $l' = -l''$, et la variation de w_1 à peu près insignifiante par rapport à $w_0 \cos\theta$ lorsque l'on passe de l'un des modes d'accouplement à l'autre, il est indifférent d'accoupler à l'avant ou à l'arrière; mais que, dans cette inversion, les contrepoids des roues extrêmes doivent être disposés en sens contraires. Cela résulte en effet de la comparaison des équations (107) et 108), où, les seconds membres restant les mêmes, les coefficients l'' et l' des premiers deviennent égaux et de signes contraires et conduisent nécessairement aux relations $\varepsilon'' - \varepsilon' = \pm\pi$, $\mu''\rho'' = \mu'\rho'$.

à cylindres extérieurs de prolonger la bielle ne serait-elle pas une raison de les préférer aux machines à cylindres intérieurs ?

Le calcul des contrepoids s'effectuera au moyen des équations (*i*) et (*j*), privées des termes qui ont pour facteurs les masses μ' et μ''.

Machines employées au chemin du Nord.

37. Nous voulons parler des machines qui présentent cela de particulier, que le centre du cercle décrit par l'extrémité de la bielle ne se trouve pas sur l'axe des roues motrices principales.

On appliquera à ces machines le mode de discussion dont nous avons fait usage dans les n^os^ 34 et 35 ; seulement, l n'étant pas nul, on pourra considérer comme essieu moteur principal celui qui est le plus voisin de la droite qui joint les centres des cercles décrits par les extrémités des bielles, et prendre l pour l'abscisse de cet essieu. Il faudra donc, dans la discussion et les applications, conserver les derniers termes des seconds membres des équations (*h*). A cela près, le calcul des contrepoids s'effectuera, pour ces machines, de la même manière que pour les machines étudiées plus haut qui présentent le même mode d'accouplement.

BASES D'UN PROJET RATIONNEL D'EXPÉRIENCES A ENTREPRENDRE POUR RÉSOUDRE LES QUESTIONS ACTUELLEMENT INACCESSIBLES A L'ANALYSE MATHÉMATIQUE DANS LA THÉORIE DE LA STABILITÉ DES MACHINES LOCOMOTIVES EN MOUVEMENT.

38. Les expériences que nous proposerons aux ingénieurs ont leur point de départ dans la théorie exposée dans ce mémoire. Il se pourrait cependant que l'on trouvât utile de vérifier expérimentalement l'exactitude de la théorie elle-même. Nous commencerons donc par dire quelques mots des procédés à employer pour effectuer cette vérification. Une opinion très

généralement répandue consiste en ce que les résultats obtenus au moyen d'expériences faites en petit ne prouvent rien lorsqu'il s'agit des applications en grand. La question qui nous occupe offre un exemple où, au contraire, une expérience en petit peut être rendue plus démonstrative qu'une expérience en grand. Les expériences faites jusqu'ici sur la stabilité des locomotives ont consisté à suspendre une telle machine munie successivement de divers systèmes de contrepoids et à mettre en mouvement l'appareil moteur; puis on constatait plus ou moins imparfaitement les oscillations du bâtis de la machine. Or il est clair que les effets provenant du mouvement de l'appareil moteur devaient être d'autant moins sensibles que la masse entière de la locomotive était plus considérable par rapport aux masses des pièces mobiles, et que ces effets se seraient trouvés considérablement augmentés s'il avait été possible de réduire la masse des pièces fixes au seul bâtis de la locomotive. Ce mode d'expérimenter, impraticable avec une locomotive, peut au contraire s'appliquer avec la plus grande facilité à un petit modèle. Imaginons un châssis très léger et aussi très résistant, sur lequel on établirait trois paires de roues pouvant être accouplées de diverses manières, et deux systèmes de manivelles, bielles et piston, dont les masses seraient considérables par rapport à celles du châssis et des roues. Quant à la mise en mouvement de ces pièces, elle serait obtenue, soit au moyen de la vapeur, soit plus simplement à l'aide d'un mouvement d'horlogerie communiquant directement avec l'axe de l'essieu moteur principal. Cet appareil serait suspendu à des lames élastiques, dont les flexions mesureraient les excursions verticales des points de suspension. Des indicateurs, ou tout autre mode d'observation, donneraient la mesure des excursions du bâtis, tant dans le sens longitudinal que dans le sens latéral. Les premières expériences auraient pour objet de constater les divers mouvements du bâtis, lorsque les roues motrices non munies de contrepoids seraient animées de vitesses moyennes de rotation déterminées. Voici ensuite les vérifications de la théorie

que l'on pourrait se proposer à l'aide de cet appareil : 1° on appliquerait aux roues autres que les roues motrices principales des contrepoids calculés à l'aide des formules (*h*) n° 33, et l'on constaterait que le mouvement de *galop* a disparu ; 2° on armerait en outre les roues motrices principales de contrepoids calculés d'après les formules (*i*) et (*j*) en y faisant $\theta' = 0$, et l'expérience montrerait que les mouvements de *tangage* et de *lacet* sont supprimés, tandis que les *oscillations verticales* et le mouvement de *roulis* subsistent ; 3° ces derniers contrepoids seraient remplacés par d'autres calculés suivant les mêmes formules, mais en y faisant $\theta' = \pm\frac{\pi}{2}$, et l'on trouverait que les oscillations *verticales* et le mouvement de *roulis* ont cessé de se produire, tandis que le *tangage* et le mouvement de *lacet* se sont manifestés de nouveau ; 4° on pourrait comparer les effets de deux systèmes de contrepoids des roues motrices principales calculés avec des valeurs égales et de signes contraires de θ', mais différentes de zéro ou $\frac{\pi}{2}$, et s'assurer que, pour des vitesses égales, les mouvements qui subsistent acquièrent des amplitudes égales respectivement ; 5° enfin, l'appareil étant supposé avoir au moins quatre roues accouplées, il y aurait à changer la bielle en y substituant une bielle prolongée du côté du bouton de la manivelle, et munie, de ce côté, d'un contrepoids capable de faire équilibre au poids de la bielle et du piston autour du bouton de la manivelle ; en d'autres termes, la bielle devrait être disposée de manière à satisfaire à la condition $k = 0$ ou $k' = 0$, la valeur de k étant donnée par l'équation (*c*) n° 33. Dans cette circonstance, tous les contrepoids seraient changés et calculés d'après les équations (*h*), (*i*) et (*j*). L'expérience montrerait alors que tous les mouvements ont sensiblement disparu ; il ne devrait subsister que ceux qui répondent aux termes du 2e ordre et des ordres supérieurs, que nous avons négligés, et aux termes dépendants des variations de vitesse, dont nous n'avons pu réduire les coefficients à zéro. (Voir équations du n° 28.)

Dans cette dernière expérience, il serait nécessaire d'employer un ressort moteur plus fort, ou une plus haute pression si l'on employait la vapeur, pour vaincre les frottements qui se développeraient, par des vitesses un peu considérables, sur les glissières et les boutons des manivelles motrices; les sections des bielles, les boutons de manivelles et les glissières elles-mêmes devraient, d'ailleurs, présenter une résistance suffisante aux efforts qui répondent aux variations de la vitesse angulaire des bielles et au carré de cette vitesse.

Telles sont les expériences qu'il y aurait lieu de faire préalablement si l'on avait quelques doutes sur l'exactitude de notre théorie, et qui seraient de nature à en vérifier les points fondamentaux; mais les expériences que nous avons plus particulièrement en vue sont d'une tout autre nature et doivent être faites, non avec des modèles en petit, mais bien sur des locomotives faisant un service assez régulier pour qu'il soit possible de constater sûrement les inconvénients que peut présenter un système donné de bielle et de contrepoids.

39. Nous avons vu que toutes les conditions théoriques de la stabilité seraient remplies dans les machines accouplées si l'on prolongeait la bielle de manière à satisfaire à l'équation $k = 0$, ce qui rendrait les autres équations de condition indépendantes de l'indéterminée θ'; nous avons dit aussi, n° 27, quels inconvénients entraînerait la réalisation de cette condition. Quant aux machines à roues indépendantes, il n'est pas possible, même théoriquement, de satisfaire à l'ensemble des conditions de la stabilité. Mais il résulte de ce qui a été exposé au n° 27 que, dans tous les cas, il ne naîtrait d'inconvénients sensibles d'un prolongement de la bielle qu'à partir du point où l'on aurait $w_0 = 0$ ou $B'' = B$; en sorte qu'il sera toujours avantageux de prolonger la bielle au moins jusqu'à ce point. La quantité k ne pouvant généralement être rendue nulle dans la pratique, et les conditions $k = 0$ et $w_0 = 0$ se trouvant incompatibles dans les machines à roues indépendantes, la détermination des

contrepoids dépend à la fois des quantités k et ω_0 relatives à la bielle, et de l'indéterminée θ' (on pourrait ici substituer à θ' la somme $\theta + \theta'$, considérée comme une seule variable, mais d'autres considérations vont nous conduire à conserver la variable θ'). Le problème général qu'il nous reste à aborder consiste à déterminer la distribution de la masse de la bielle et la valeur de θ', qui, dans un système donné de locomotive, entraînent la moindre somme d'inconvénients.

Les inconvénients relatifs à l'accroissement des pressions exercées sur les glissières et les boutons des manivelles ont été examinés n° 27, et l'on a vu que cet accroissement dépend particulièrement de ω_0 et à un moindre degré de k. En se reportant aux équations du n° 28, qui donnent les variations des sommes des composantes des actions exercées par les rails et de leurs moments, on reconnaît que les variations restantes après l'application des contrepoids dépendent principalement de k et θ', tandis que ω_0 n'exerce qu'une assez faible influence. (L'indéterminée θ' se présente, dans ces équations, isolée de l'angle θ.) Admettons que l'on puisse assigner numériquement la somme des inconvénients à redouter, et soit χ cette somme: la quantité χ est une fonction des trois variables k, ω_0, θ', lorsque la forme de la bielle est indéterminée, et de la seule variable θ' lorsque l'état de la bielle est fixé d'une manière définitive. La recherche du minimum d'une fonction de trois variables par voie expérimentale étant à peu près impraticable, il convient de réduire ce nombre à deux, si cela se peut. On y parviendra de la manière suivante : dans le but d'accroître le moins possible la masse de la bielle, et par suite celle des contrepoids, supposons que l'on prolonge la bielle au moyen d'une tige prismatique, suffisamment résistante, d'une quantité telle que l'équation $\omega_0 = 0$ soit satisfaite, et admettons d'ailleurs qu'aucun obstacle ne s'y oppose; puis adaptons à l'extrémité de ce prolongement une masse de forme soit lenticulaire, soit sphérique, ou mieux un simple disque. Si l'on fait croître cette masse en changeant seulement l'une de ses dimensions,

par exemple le rayon de la lentille, de la sphère ou du disque, il est clair que ω_0 augmentera, tandis que k diminuera : les deux variables se trouveront ainsi remplacées par une variable unique, qui sera ce même rayon. Désignons cette nouvelle variable par $\mathcal{R}$; χ ne sera plus fonction que de $\mathcal{R}$ et θ'. Ajoutons que, si quelque obstacle s'opposait à ce que l'on prolongeât la bielle au moyen d'une tige prismatique capable de satisfaire à l'équation $\omega_0 = 0$ sans addition de masse à l'extrémité, le prolongement serait restreint dans les limites assignées par les obstacles, et l'on ajouterait une masse telle que l'on eût $\omega_0 = 0$. Dans les expériences, on ferait croître successivement le rayon $\mathcal{R}$, le centre étant assujetti à se trouver sur un point constant du prolongement.

Quant à la variable θ', il convient de fixer les limites entre lesquelles on devra en étudier les variations.

Nous avons fait remarquer, n° 22, que le changement de θ' en $\pi + \theta'$ dans les formules (74) n'apporte aucun changement dans les expressions qui servent à calculer les contrepoids : d'où il suit que les valeurs des inégalités qui subsistent dans les équations de translation et de rotation appliquées à des systèmes de contrepoids calculés avec les valeurs θ' et $\pi + \theta'$ sont identiques, ce dont on peut s'assurer d'ailleurs en constatant que les équations du n° 28 ne subissent aucun changement lorsque l'on y met $\pi + \theta'$ à la place de θ'.

On voit déjà qu'il suffirait d'étudier les variations de l'angle θ' dans un espace angulaire égal à une demi-circonférence. Mais il a été établi, n° 28, que deux systèmes de contrepoids calculés avec des valeurs égales et de signes contraires de θ', présentent le même degré de stabilité. Dans l'un et l'autre, les inégalités des réactions des rails se succèdent dans le même ordre et avec la même intensité, à la seule différence près que les situations de la manivelle correspondantes à des effets égaux ne sont plus les mêmes. Quant aux inconvénients qui se rattachent aux variations de pression des extrémités de la bielle sur les glissières et les boutons de manivelle, ils ne dépendent

que de ω_0 et k. Il paraît donc très naturel d'admettre que les inconvénients relatifs à des valeurs égales et de signes contraires de θ' sont égaux. Au reste, l'expérience pourrait être utilement invoquée pour confirmer cette prévision. De ceci il résulte que généralement il suffira d'étudier les effets de la variation de θ' dans l'intervalle angulaire d'un angle droit.

40. Examinons d'abord le cas le plus simple, celui dans lequel la forme de la bielle sera donnée d'une manière invariable, comme dans les machines à cylindres intérieurs : la quantité χ représentant la somme des inconvénients sera une fonction de la seule variable θ'. Les contrepoids des roues, autres que les roues motrices principales, destinés à faire disparaître les tendances au mouvement de *galop*, seront calculés conformément aux prescriptions des n^{os} 33 et suivants, et resteront les mêmes pendant toute la série des expériences. On adaptera successivement aux roues motrices principales des systèmes de contrepoids calculés avec des valeurs diverses de θ', telles que 0°, 30°, 60°, 90°. Chaque valeur de θ' fournira une valeur de χ, et l'on construira une courbe en prenant θ' pour abscisse et χ pour ordonnée; il est clair que l'ordonnée χ présentera un minimum entre les abscisses $\theta' = o°$ et $\theta' = 90°$. On n'aura plus qu'à déterminer la valeur de θ' qui répond à ce minimum. Or, comme, dans le voisinage d'un maximum ou d'un minimum, les ordonnées varient très peu, on pourra prendre, non pas précisément la valeur de θ' qui correspond au minimum, et que d'ailleurs il serait difficile de déterminer exactement, mais une valeur de θ' correspondante à une ordonnée χ peu différente de ce minimum. Il s'en trouvera généralement deux qui répondent à une même valeur χ; on sera donc libre de choisir celle qui présente le plus d'avantages à d'autres égards.

Si la machine est à cylindres intérieurs, et que la distribution de la masse de la bielle ait été faite de manière que la quantité ω_2 approche le plus possible d'être nulle, les expé-

riences seront terminées pour cette machine, et l'on n'aura plus qu'à appliquer aux roues motrices principales le système de contrepoids correspondant à la valeur de θ' que l'on aura admise.

Il y aurait avantage, dans une première série d'expériences, à essayer un plus grand nombre de valeurs de θ'; on pourrait, par exemple, expérimenter sur les valeurs 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, en ayant le soin de prendre ces valeurs alternativement positives et négatives : la courbe des valeurs de χ étant ensuite construite sans avoir égard aux signes de θ', c'est-à-dire en prenant toutes les abscisses positives, la continuité de la courbe ainsi obtenue confirmerait ce que nous avons avancé sur ce qu'il y a d'indifférent à employer des valeurs égales et de signes contraires de θ'.

Considérons actuellement le cas général où la distribution de la masse de la bielle et la quantité θ' sont indéterminées. Une première série d'expériences, faites sans addition de masse à l'extrémité de la bielle prolongée, ou même, s'il est nécessaire pour obtenir $\omega_0=0$, avec une masse additionnelle de rayon $\mathcal{R}$, fera connaître la valeur de θ' correspondante à une valeur nulle ou positive de $\mathcal{R}$ pour laquelle χ est un minimum. Dans une seconde série d'expériences, on augmenterait le rayon $\mathcal{R}$, et l'on constaterait encore les valeurs correspondantes de θ' et du minimum de χ. En faisant varier de la sorte le rayon $\mathcal{R}$ progressivement, on obtiendra une série de valeurs minima de χ, et l'on s'arrêtera lorsque le décroissement du minimum de χ devient insensible, ou lorsque ce minimum commencera à croître. On obtiendra ainsi le minimum des minima de χ, puis la valeur correspondante de θ', et le problème sera résolu. Nous observerons, comme plus haut, qu'il ne sera pas nécessaire d'atteindre ce minimum, et que l'on pourra s'en tenir à un autre peu différent et qui exige une moindre masse additionnelle. Il est extrêmement probable que ce minimum absolu se présentera avant que l'on ait atteint la limite théorique $k=0$, même dans les machines à marchandises, qui ne sont

pas destinées aux grandes vitesses. Ayant fixé le minimum de χ auquel on s'en tiendra, les valeurs correspondantes de $\mathcal{R}$ et θ' serviront à calculer le système de contrepoids qu'il faudra adopter définitivement.

On voit que, dans ces expériences, les contrepoids destinés à faire disparaître les tendances au mouvement de *galop* devront être changés chaque fois que l'on changera la valeur de $\mathcal{R}$.

Nous pourrions presque nous dispenser d'ajouter que, dans chaque série d'expériences, le serrage des ressorts de suspension devra être réglé de manière que les oscillations du bâtis restent sensiblement comprises entre des limites données. S'il devenait nécessaire de serrer les ressorts de telle sorte que leur élasticité ne fût plus suffisante pour parer aux actions imprévues, il faudrait rejeter le système de valeurs correspondantes de $\mathcal{R}$ et θ'. On devrait rejeter également tous ceux qui laisseraient subsister des mouvements que la pratique ne tolère pas, bien que l'usé local des bandages et les frais de traction donnent une valeur admissible de χ; mais nous pensons que cette dernière circonstance ne se présentera guère que pour des valeurs de θ' voisines de $\pm\frac{\pi}{2}$.

Enfin, nous croyons devoir revenir sur les conditions de résistance, en engageant les expérimentateurs à s'assurer par le calcul si, pour chacune des valeurs de $\mathcal{R}$, l'étendue et la forme des sections transversales les plus exposées de la bielle présentent une garantie suffisante contre les accidents, et à faire des calculs analogues en ce qui concerne les boutons des manivelles principales, et même les glissières.

41. Nous avons maintenant à dire quelques mots de l'évaluation numérique de la fonction χ, évaluation que nous avons tout d'abord supposée praticable, afin de simplifier notre exposé. A cet égard, nous croyons que les ingénieurs attachés aux services des chemins de fer seront plus compétents que nous ne le pouvons être. Néanmoins, nous allons indiquer un

moyen que nous recommanderions, si le temps qu'il semble devoir exiger ne nous paraissait pas trop considérable. Nous présenterons ce moyen comme un exemple de la possibilité d'évaluer numériquement la fonction χ, afin que, si l'on veut rechercher un procédé d'expérimentation plus facile et plus rapide, on ne perde pas de vue le caractère de cette fonction.

Il faudrait, avons-nous dit, rejeter les expériences dans lesquelles la stabilité obtenue ne se trouverait pas suffisante : la fonction χ ne doit donc plus représenter que les inconvénients qui subsistent après que la stabilité désirable aura été réalisée, inconvénients provenant tant des petits mouvements non détruits que de la tendance d'autres mouvements à se manifester; puis aussi ceux qui pourront provenir de la stabilité obtenue.

Les tendances aux mouvements et les mouvements eux-mêmes déterminent, de la part des rails, des réactions qui produisent l'usé local des bandages. D'ailleurs la stabilité peut avoir été obtenue au prix d'un accroissement de l'intensité des réactions mutuelles des organes de la machine. De là un accroissement du travail des frottements, une détérioration plus rapide de quelques uns de ces organes, et la nécessité de les réparer plus fréquemment.

Ceci posé, voici comment la valeur numérique de χ semblerait pouvoir être déterminée. On ferait fonctionner la locomotive à étudier, avec des contrepoids calculés au moyen de valeurs données de $\mathcal{R}$ et θ', jusqu'à ce qu'elle dût rentrer dans les ateliers pour y être réparée, en ayant soin que, pendant toute la durée des expériences, elle soit consacrée à un même service, qu'elle soit alimentée de la même espèce de combustible, et que la vapeur y soit produite et utilisée de la même manière. On constaterait les frais de tournage des roues et ceux qui leur correspondent dans la détérioration des bandages, puis les frais de réparation et d'entretien des autres organes mobiles de la machine, enfin la dépense de combusti-

ble. On ramènerait ensuite, au moyen des registres de service de la machine, la somme de ces frais à la partie proportionnelle qui est relative au transport d'une tonne à un kilomètre : le résultat représenterait la valeur numérique de χ. Il doit être entendu que l'on ne ferait pas figurer dans l'état des dépenses celles qui seraient occasionnées par l'expérience elle-même : en effet, certaines pièces, manquant d'une résistance suffisante, pourraient être brisées ou mises hors d'état de servir davantage. On devrait aussi, dans le cas d'un changement survenu, pendant la durée des expériences, dans le prix des matières premières ou de la main-d'œuvre, ramener ces prix à une unité commune, etc.

Telles sont les réflexions que j'ai l'honneur de soumettre à l'examen des ingénieurs. Il ne me paraît pas possible de pousser la théorie plus loin que je l'ai fait, tant que l'on négligera l'effet des ressorts de suspension, et que l'on n'aura pas tiré de l'équation des forces vives les conditions propres à faire disparaître les variations de la vitesse. Lors même que la théorie serait achevée sous ces deux points de vue, il est probable que des conditions incompatibles, comme nous en avons trouvé, exigeraient encore le recours à l'expérience.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

SUR LA

STABILITÉ DES MACHINES.

42. Nous avons fait observer, à la fin du n° 9, que nos équations ne sont pas particulières aux locomotives, et qu'elles conviennent à toute machine remplissant les conditions de symétrie que nous avons admises pour les locomotives : elles conviennent donc aux machines de bateaux à vapeur et aux machines fixes composées de deux machines remplissant les mêmes conditions de symétrie et réunies par un bâtis commun.

Dans ce dernier cas, nos formules se simplifieraient par l'annulation des termes affectés des dérivées $\frac{d^2x_0}{dt^2}$, $\frac{d^2y_0}{dt^2}$, $\frac{d^2z_0}{dt^2}$.

En écrivant ce Mémoire, nous avions particulièrement en vue les machines locomotives, et nous n'avons pas cru nécessaire d'exposer la théorie générale de la stabilité des machines fixes. Il ne sera peut-être pas inutile d'en dire actuellement quelques mots.

Considérons les machines dont les organes sont renfermés dans un bâtis commun, et supposons d'ailleurs que ces organes puissent prendre des mouvements quelconques, sous la seule condition qu'ils soient dépendants les uns des autres ou solidaires. Les équations de translation et des moments (3), (6), (14) et (15), en y réduisant chaque second membre à son dernier terme, feront connaître les sommes des composantes et des moments des réactions exercées sur le bâtis par les fondations ou supports de la machine. En exprimant les seconds membres en fonctions d'une variable unique et de ses dérivées, puis égalant à zéro la somme des coefficients des termes variables de même espèce, on aura les conditions que doivent remplir les masses en mouvement pour que les réactions exercées par les supports soient constantes. Ajoutons que, si les travaux des forces qui sollicitent la machine sont susceptibles de recevoir une expression analytique déterminée en fonction de la variable que l'on aura choisie, l'équation des forces vives et sa dérivée permettront d'éliminer des six équations de translation et des moments, soit la variable elle-même et l'une de ses dérivées, soit plutôt ces deux dernières ; ce qui pourra donner lieu à un système de conditions différent de celui qu'on obtiendrait en faisant abstraction de l'équation des forces vives. Mais lorsque, comme dans les locomotives, l'expression du travail moteur ne peut être assignée d'une manière générale, on sera souvent obligé de se borner aux seules conditions que fournissent les équations de translation et des moments.

Si l'on peut employer simultanément les équations de trans-

lation et des moments, puis l'équation des forces vives, la destination de la machine exigera le plus généralement que l'on se pose une nouvelle condition, qui consiste en ce que la vitesse de l'un des organes reste comprise entre des limites données ou même soit constante. Cette nouvelle condition, considérée isolément, conduirait à l'emploi des règles ordinaires que fournit la théorie des volants; mais lorsque l'on se propose en même temps de satisfaire aux conditions de la stabilité que nous avons indiquées, on comprend qu'il est généralement difficile de traiter séparément les deux problèmes. En d'autres termes, il est visible que les conditions de stabilité des machines et celle de l'uniformité de leur marche donnent lieu à un problème complexe.

Lorsque tous les points des organes d'une machine se meuvent dans des plans parallèles, les différents termes qui dépendent des coordonnées ou des vitesses dans les équations ci-dessus peuvent s'obtenir facilement et sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à d'autres notions que celles exposées dans ce Mémoire; mais, si quelques uns des organes sont susceptibles de prendre des mouvements plus variés, il sera indispensable d'avoir recours aux théorèmes généraux sur la composition des moments et des vitesses angulaires des corps solides, ce qui conduit à la notion du moment principal, de l'axe instantané de rotation, et des moments d'inertie principaux. On trouve ces diverses théories exposées dans le *Traité de Mécanique* de Poisson.

Il ne suffit pas que les réactions constantes ou variables exercées par les fondations ou supports sur le bâtis soient connues, il faut encore que le bâtis lui-même soit capable de résister aux actions intérieures qui se développent pendant le mouvement. Dans la recherche de ces actions, on devra fractionner le bâtis en diverses parties, dont chacune reçoit de celle qui l'avoisine, ou des organes mobiles, des actions égales et contraires à celles qu'elle exerce sur eux et qu'il s'agit de déterminer. Ceci suffit pour faire voir que les procédés à employer pour la détermination des effets auxquels sont soumises

les différentes parties du bâtis fractionné de la sorte s'appliqueraient également aux supports isolés des machines qui ne seraient pas enfermées dans un bâtis commun ; à cela près que, pour ces machines, il n'y aura pas lieu de rechercher *à priori* les conditions de stabilité auxquelles on peut vouloir assujettir les machines que nous avons envisagées d'abord : il faut alors chercher à satisfaire à ces conditions pour chaque support en particulier, si cela est possible.

Ceci posé, en appliquant l'équation des forces vives à l'ensemble d'une machine, et négligeant dans une première approximation les parties actuellement inconnues du travail du frottement, on obtiendra, à l'aide des équations qui expriment les liaisons du système, la vitesse de chacun des points mobiles pour toute situation de la machine, et, par suite, la variation de vitesse par unité de temps ; en sorte que l'état de mouvement de chacun des organes sera complétement défini. On écrira alors, pour chacun des organes séparément, les six équations de translation et des moments, dans lesquelles on connaît déjà les forces qui proviennent de l'action de la pesanteur, puis les forces motrices et résistantes qui répondent au travail moteur et à l'effet utile de la machine. On y joindra, suivant le besoin, des équations en nombre suffisant pour lever l'indétermination qui naîtrait de l'hypothèse de la rigidité absolue des pièces (ces équations seraient fondées sur la considération de leur élasticité). La résolution de l'ensemble des équations, en ayant égard au principe de l'égalité de l'action et de la réaction, fera connaître chacune des composantes des actions mutuelles des organes mobiles et de celles qu'ils reçoivent des supports ou des parties fractionnées du bâtis. Lorsque chaque organe mobile ne communiquera pas directement avec plus de deux organes de ce genre, la résolution des équations sera considérablement simplifiée : elle pourra s'effectuer de proche en proche.

Les actions mutuelles étant ainsi déterminées, il sera possible de procéder à une seconde approximation, dans laquelle on complétera ou rectifiera le travail du frottement dans l'équation

des forces vives : pour obtenir une expression de ce travail suffisamment exacte, il était nécessaire, en effet, de déterminer au moins approximativement les actions mutuelles au contact des organes mobiles. On pourra, si cela est jugé nécessaire, déterminer de nouveau ces actions, en recommençant les calculs à l'aide des nouvelles valeurs de la vitesse et de la variation de vitesse que fournira l'équation des forces vives, lorsqu'on y aura substitué une valeur plus approchée du travail du frottement.

Les réactions des organes mobiles sur les supports étant connues pour toute position du système, on devra appliquer à ces supports les six équations de l'équilibre d'un corps solide, en introduisant dans ces équations les actions que ces supports reçoivent du sol ou des supports voisins. On examinera jusqu'à quel point il est possible et nécessaire de les rendre constantes, et, dans tous les cas, si elles sont compatibles avec la résistance du sol et des supports.

Pour donner une idée de la manière dont il convient d'étudier la résistance des organes mobiles eux-mêmes, nous considérerons le cas des bielles.

Imaginons une section faite par un plan perpendiculaire à l'axe de figure, et menons par le centre de gravité de la section un axe perpendiculaire au plan du mouvement; considérons l'une des deux parties ainsi séparées de la bielle, et dont le mouvement est censé connu par ce qui précède, ainsi que toutes les forces qui la sollicitent, à l'exception des forces moléculaires développées dans le voisinage de la section par les molécules appartenant à l'autre partie de la bielle. En appliquant deux équations de translation et une équation des moments à la partie de la bielle que nous considérons, on obtiendra les sommes des composantes parallèles et perpendiculaires à l'axe de la bielle dans le plan du mouvement, et la somme des moments de ces actions moléculaires autour de l'axe passant par le centre de gravité de la section. A l'aide de ces quantités et de la forme de la section, la théorie ordinaire de

la résistance des matériaux fera connaître l'effort auquel est soumise la fibre la plus exposée à la contraction ou à l'allongement : le coefficient d'élasticité indiquera ensuite si cet effort est compatible avec la substance dont la bielle est construite.

La question serait résolue s'il s'agissait seulement d'étudier la résistance que présente la bielle en une section déterminée ; mais le problème est plus compliqué. Ayant obtenu l'expression du plus grand effort auquel soit exposée une fibre d'une section donnée, il restera à rechercher quelles sont la section et la position de la bielle pour lesquelles ce plus grand effort est un maximum, et si ce maximum est compatible avec la résistance de la matière de la bielle.

Le cas relatif à la résistance des jantes de roues ou de volants est assez familier aux ingénieurs pour que nous nous dispensions de l'examiner ici.

Quant à la résistance des arbres aux efforts de torsion, les notions les plus exactes que l'on possède sur cette matière délicate ont été exposées par M. Barré de Saint-Venant.

L'étendue déjà considérable de ce Mémoire nous empêche d'entrer dans plus de détails pour le moment.

ADDITION

Relative au prolongement de la bielle.

Tout en indiquant la possibilité d'obtenir aisément certains résultats par une autre voie, nous avons dit au commencement du Mémoire, n° 2, que nous suivrions la méthode analytique comme offrant plus de sécurité. La confusion qui règne dans les idées de beaucoup de personnes sur certains points de la mécanique nous en faisait une obligation, sous peine d'entreprendre la tâche difficile de rectifier les idées fausses. A l'aide des deux principes qui nous ont servi de point de départ, et qui sont admis par tout le monde, il nous a été possible de réduire nos recherches à un travail d'analyse pure. Nous aurions manqué notre but en intercalant des démonstrations

géométriques. Il était d'ailleurs utile d'obtenir les expressions calculables des composantes et des moments des réactions des rails, puisque les expressions du n° 28 qui se rapportent à notre système de contrepoids conservent encore des parties variables, lorsque les quantités k et w_0 ne sont point annulées. Les relations (86) et (87), qui donnent jusqu'à un certain point la mesure de l'efficacité de ce système, étaient également utiles à former.

Nous pensons qu'on ne nous saura pas mauvais gré d'éclaircir, par quelques considérations très simples, ce que pourrait avoir d'obscur pour quelques ingénieurs la nécessité de prolonger la bielle de manière à satisfaire à la condition $k=0$.

Sans qu'il soit nécessaire de rentrer au fond dans la question de la stabilité des locomotives en mouvement, on admettra aisément que les conditions générales doivent comprendre celle-ci : que le centre de gravité des organes en mouvement doit rester fixe relativement au bâtis de la machine. Nous allons vérifier qu'effectivement nos équations satisfont à cette condition, dans le cas simple des machines à roues indépendantes, où l'on supposerait que les centres de gravité du piston, de la bielle, de la manivelle et du contrepoids, sont situés dans un même plan.

En admettant que le centre de gravité de ces diverses masses puisse se déplacer, il est aisé de voir que le déplacement de ce centre de gravité sera le même que celui d'un autre système de masses différent du précédent en cela seulement que la masse entière du piston sera concentrée au point d'articulation de la bielle et de la tête du piston : ce point et le centre de gravité du piston sont effectivement animés des mêmes vitesses.

Nous avons établi n° 21 que la quantité k est le moment de la masse de la bielle et de celle du piston concentrée à l'extrémité de la bielle, par rapport au bouton de la manivelle. La condition $k=0$ revient donc à ce que le centre de gravité de ces masses passe par l'axe du bouton. On voit déjà que le mouvement du centre de gravité général sera celui du système formé

par le contrepoids, la manivelle, et les masses de la bielle et du piston concentrées au bouton de la manivelle. Il est évident que ce centre de gravité général ne restera immobile dans toutes les positions du système qu'autant qu'il passera par l'axe de l'essieu; ce qui exige que le centre de gravité du contrepoids soit situé sur le prolongement de la manivelle, et que la somme des moments autour de l'axe de l'essieu soit nulle, ou que le contrepoids fasse équilibre aux autres masses autour de cet axe.

Examinons comment nos équations (*i*) et (*j*) du n° 33 s'accordent avec ces résultats. L'hypothèse faite sur la situation des centres de gravité dans un plan unique entraîne l'égalité des coordonnées λ, A et A''' : d'où, en vertu des éq. (*e*) n° 33,

$$U=\frac{V}{\lambda};$$

la condition $k=0$ annule k', éq. (*d*); et les équations (*i*) donnent

$$\mu\rho\sin\varepsilon=0, \quad \mu\rho\cos\varepsilon=-U.$$

(Les équations (*j*) donnent des résultats tout pareils.)

On en tire $\varepsilon=180°$, à cause de U positif; et $\mu\rho=U$. Or, en vertu de la première équation (*e*), U n'est autre chose que la somme des moments autour de l'axe de l'essieu, de la masse de la manivelle et des masses de la bielle et du piston concentrées au bouton de la manivelle. En ayant égard à la signification de ε et $\mu\rho$, on voit que nos équations (33) fournissent des résultats qui s'accordent effectivement avec les précédents.

L'explication que nous venons de présenter ne prouve pas, il est vrai, qu'aucune autre disposition des masses ne remplirait la condition de l'immobilité relative du centre de gravité général; mais nous avons démontré assez simplement (séance du 7 mars 1851), en nous fondant sur la définition des coordonnées du centre de gravité, que le prolongement de la bielle offre la solution unique (nous avons évité, par un tour particulier de démonstration, la réduction en séries du radical qui exprime la valeur de $\cos\beta$).

ERRATA.

Page	Ligne	Au lieu de	Lisez
25	fig. (1)	horizontal	horizontale
37	3	$-\frac{d^2z}{dt^2}$	$-\xi\frac{d^2z}{dt^2}$
45	3 en remontant	$+\sin\theta\,M\frac{d^2z}{dt^2}$	$+\sin\theta\,\Sigma M\frac{d^2z}{dt^2}$
52	4 en remontant (note)	B^i	B_i
53	6 en remontant (note)	$\frac{1}{2}(C_1+C)$	$\frac{1}{2}(C_1+C_n)$
54	3 de la note	$-i\frac{A}{\rho_i}$	$-i\frac{A_i}{\rho_i}$
55	5	$\frac{d^2\alpha}{dt^2}$,	$\frac{d^2\alpha}{dt^2}$
59	col. éq. (z), dern. lig.	$-\mu\rho\lambda\sin e\sin\alpha\frac{d^2\alpha}{dt^2}$	$-\mu\rho\lambda\sin e\sin\alpha\frac{dz^2}{dt^2}$
Tableau du n° 15	éq. (x), 3e lig. (bielle)	$\sin 2i\alpha.\frac{dz^2}{dt^2}$	$\sin 2i\alpha.\frac{d^2\alpha}{dt^2}$
	éq.(y),1re col.,der.lig.	$+\left(\frac{dv}{dt}g-\sin g'\right)$	$+\left(\frac{dv}{dt}-g\sin g'\right)$
62	4 en remontant	$\frac{1}{2}T_0\Sigma M$	$\frac{1}{2}\Gamma_0\Sigma M$
63	1	T_0	Γ_0
69	3	$\sin(4i+2\alpha)$.	$\sin(4i+2)\alpha$
73	éq. (z), dern. ligne	$+k\cos\theta A$	$+k\cos\theta\Lambda$
77	1 de la note	B	B^i
96	4e équation (81)	$+k\frac{r}{B}V$	$+k\frac{r}{B}\Lambda$
103	dernière	$\mu''\rho''\frac{\sin}{\cos}\varepsilon'''$	$\mu''\rho''\frac{\sin}{\cos}\varepsilon''$
123	6	$\frac{z_0}{x}$	$\frac{z_0}{x_0}$
131	6 en remontant	maniv elleui	manivelle qui
136	4	duc hemin	du chemin

Page 124, *ligne* 2 *en remontant*, *après* 1000 kilogr., *ajoutez :* par rapport à la charge moyenne, en sorte que l'amplitude de cette variation atteint presque 2000 kilogrammes.

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

(Juillet, Août et Septembre 1851)

N° 14.

Pendant le trimestre, on a traité les questions suivantes :

1° Discussion de la construction des ponts suspendus (V. le résumé des séances, p. 145) ;

2° Construction des grilles de foyer (V. le résumé des séances, p. 153);

3° Travaux de sondage (V. le résumé des séances, p. 155);

4° Application du calcul aux ressorts (V. le résumé des séances, p. 156);

5° Echappement variable à orifice annulaire (V. le résumé des séances, p. 171);

6° Alimentation de la ville de Constantinople (V. le résumé des séances, p. 183);

7° Exposition de Londres, machines de bateaux à vapeur (V. le résumé des séances, p. 186);

8° Balance de sûreté pour les machines à vapeur (V. le résumé des séances, p. 195);

9° Discussion sur la désincrustation des chaudières des machines à vapeur (V. le résumé des séances, p. 196 à 203).

Pendant ce trimestre, la Société a reçu :

De M. Benoist Duportail, un exemplaire de son ouvrage sur

la réception du matériel des chemins de fer et des appareils mécaniques en général.

De M. Léon Yvert, un exemplaire de sa Notice sur les ponts avec poutres tubulaires en tôle.

De M. Guibal, un exemplaire d'un rapport fait en 1844 sur un voyage en Angleterre, adressé à la Société de commerce de Bruxelles et à M. Rainbeaux, administrateur et propriétaire du carbonnage du Grand-Hornn, par MM. Guibal, Boty et Glepin.

De M. Bridel, une note sur l'emploi de la tourbe à l'usine d'Undreveillers, dans le canton de Berne, en Suisse, pour la fabrication du fer.

De M. Polonceau, une note sur une nouvelle balance de sûreté à échappement instantané.

Pendant ce trimestre, on a admis comme membre sociétaire M. Petitgand, présenté par MM. Eug. Flachat, A. Barrault et E. Lorentz.

MÉMOIRE N° XXVII.

Résistance du fer et de la fonte, basée principalement sur les recherches expérimentales les plus récentes faites en Angleterre.

PAR M. LOVE.

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES.

1. Depuis plus de vingt ans, il n'a été presque rien ajouté, en France, aux données pratiques de la résistance du fer et de la fonte fournies par Duleau et Tredgold. Pendant cette même période, au contraire, l'emploi de plus en plus fréquent de ces métaux dans les constructions de chemins de fer et dans les usines, en Angleterre, a bientôt démontré la rigoureuse nécessité de se livrer à de nouvelles expériences, plus multipliées, plus complètes, afin de donner aux anciennes formules une nouvelle sanction, si elles devaient être conservées, ou d'y apporter les changements convenables pour mieux les adapter aux faits, si elles étaient insuffisantes. Les formules alors en usage dans ce pays avaient été établies en vue de donner directement le poids qu'une pièce pouvait supporter sans danger, celui que l'on supposait incapable de faire franchir la *limite d'élasticité;* et les expériences dont ces formules avaient été déduites n'avaient eu naturellement pour objet que la détermination de cette *limite d'élasticité*. Mais, aujourd'hui, M. Hodgkinson a établi d'une manière incontestable, par les résultats d'une longue pratique et d'une grande habileté dans l'art expérimental, que l'on s'était fait illusion en croyant pouvoir fixer par l'observation le point où l'élasticité du métal commençait à s'altérer; il a démontré qu'il faut en toutes circonstances pousser les épreuves jusqu'à la *rupture*, et que cette phase de la résistance des solides est le seul point d'où l'on puisse partir avec sécurité pour établir des formules pratiques de résistance.

Les expériences d'où ressort, comme une conséquence nécessaire, le résultat général qui vient d'être énoncé, ont été faites dans trois circonstances différentes, et ont donné lieu, à des époques diverses, à trois publications du plus haut intérêt.

2. En 1846, M. Hodgkinson résuma dans un ouvrage trop peu connu en France les expériences qui avaient été faites depuis une quinzaine d'années, en grande partie par lui-même, et en partie aussi par M. W. Fairbairn, un des plus habiles praticiens anglais. Dans ce volume, qui faisait suite à une nouvelle édition de l'Essai de Tredgold sur la résistance de la fonte, il relevait déjà les erreurs commises par cet auteur et ses adhérents sur la question de l'*élasticité*. Ce travail se distinguait en outre par de nouvelles expériences, plus complètes, plus étendues que toutes celles qui avaient paru jusque alors sur la résistance de la fonte à la traction, à la compression, à l'effort transversal, et surtout sur la résistance des piliers ou colonnes. Cette question des piliers, que tous les auteurs avant lui avaient négligée sous le rapport expérimental, est devenue aujourd'hui, grâces aux recherches de M. Hodgkinson, une des questions les plus importantes de la résistance des matériaux, si ce n'est peut-être la plus importante de toutes : car on n'a plus simplement à considérer les piliers au point de vue du rôle qu'ils jouent dans les constructions sous la forme et dans la position d'une colonne ordinaire; mais il faut reconnaître qu'ils deviennent, dans beaucoup de cas, l'élément principal de la résistance des solides à un effort transversal. En effet, l'on verra qu'il existe des solides dont on ne peut connaître la résistance transversale qu'après avoir déterminé préalablement le taux de résistance de leur partie supérieure, considérée comme résistant à la manière d'un pilier.

3. En 1847, un accident grave étant survenu par la rupture d'une poutre en fonte d'un pont de chemin de fer, l'opinion publique s'en émut. Pour ramener la tranquillité dans les esprits, pour édifier l'administration Anglaise sur les mesures à prendre à l'égard des constructions en métal, et enfin pour

mettre à la disposition des ingénieurs des documents pratiques qui leur permissent à l'avenir d'atteindre plus sûrement cette condition essentielle de toute construction, la *sécurité*, une commission d'enquête fut instituée par ordonnance royale, à la fin de la même année, ayant pour mission de chercher à éclairer la question par tous les moyens possibles. A cet effet, une instruction fut poursuivie, dans laquelle on réunit les avis des ingénieurs et des praticiens les plus distingués de l'Angleterre sur toutes les questions de fabrication et d'emploi du fer et de la fonte. En outre, des expériences nombreuses furent entreprises, en prenant à peu près ce point de départ : *que l'on*

…nce du fer et de la fonte. La commis-
…s travaux vers le milieu de l'année
…ns deux volumes, qui, bien que
…urent mis en vente, afin que les in-
…s d'intérêt que qui que ce fût à en
…ssent se les procurer (1).

…ants obtenus par la commission d'en-
…outer ceux qui résultaient des nom-
lesquelles M. R. Stephenson préluda
…ponts tubulaires. Tous ces documents
…précieuse dans laquelle les savants,
…trouveront des faits capables de re-
les praticiens un ensemble de rensei-
…s mettront à même de faire de nou-
…x entendues, et dans lesquelles ils

…e, une enquête administrative à la suite du
…pendu d'Angers. Mais quel en a été le résul-
e public a pu en voir sortir, ce sont des me-
les ponts suspendus, qui, loin de le rassurer,
…pirer de nouvelles appréhensions. On verra
que raison de les partager, et qu'il y a beau-
n pont suspendu, surtout en fil de fer, pré-
nable.

DUE

If this book is not returned on or before the above date a fine of five (5) cents per day will be incurred by the borrower.

The charge for this book may be renewed if no one is waiting for it.

To renew the charge, the book must be brought to the desk.

DO NOT RETURN BOOKS ON SUNDAY

GENERAL LIBRARY
University of Michigan

pourront, ce qui ne s'est peut-être jamais rencontré, satisfaire à la fois à ces deux conditions, que l'on ne devrait jamais perdre de vue ni séparer l'une de l'autre : *la sécurité*, *l'économie*.

5. Telle est, du moins, la situation nouvelle que fait aux ingénieurs anglais la publication des documents qui viennent d'être passés en revue. En est-il de même en France ? On ne peut l'affirmer. Nous avons dans ce pays peu de goût pour les langues étrangères, et nous sommes tellement persuadés que nous marchons sur tous les points à la tête de la civilisation, bien qu'il en soit tout autrement en maintes occasions, que nous montrons, en général, un dédain superbe pour tout ce qui se fait chez nos voisins. Ainsi, par exemple, il y a plus de dix ans que M. Hodgkinson a fait faire un pas considérable à la science expérimentale et à l'art des constructions en fonte en Angleterre, et le nom de cet habile expérimentateur commence seulement à être connu dans notre pays.

Cependant il importe bien plus aux Français qu'aux Anglais de connaître les résultats des dernières expériences ; car ces derniers ont à peu près terminé leur réseau de chemins de fer, tandis que les premiers ont fait à peine la moitié de leur tâche, s'ils veulent, dans cette voie, marcher de front avec leurs voisins, même les plus humbles. On ne peut donc méconnaître qu'il est urgent que les résultats pratiques obtenus en Angleterre soient au plus vite répandus parmi les ingénieurs français. Pour remplir ce but, autant que mes faibles moyens le permettaient, je m'étais proposé de publier un travail dans lequel j'avais réuni et analysé les expériences les plus intéressantes faites dans les circonstances diverses qui viennent d'être énumérées, en les accompagnant des formules qui en dérivaient. Mais tous ces documents rassemblés formaient un ouvrage assez volumineux ; et, réfléchissant que je m'adressais principalement à des hommes pratiques qui n'ont pas le temps d'entrer dans les détails de toutes les expériences et des procédés à l'aide desquels les formules avaient été obtenues, j'ai cru utile de réduire mon travail à sa plus simple expres-

sion, et de le présenter à la Société des ingénieurs civils sous la forme d'un Mémoire, dans lequel je me borne, en général, à rapporter succinctement les principaux résultats, et à donner les formules applicables aux divers genres d'efforts, aux diverses formes de solides, en les appuyant par des applications à des cas d'expériences. Pour ceux qui ont le temps de pousser leurs investigations plus loin, je cite les ouvrages auxquels j'ai eu recours ; et, comme ils sont assez dispendieux, il n'est peut-être pas hors de propos que je dise ici qu'on les trouve presque tous à la bibliothèque du Conservatoire des arts et métiers (1).

Il me reste à dire, pour terminer ces observations préliminaires, qu'outre les expériences particulières auxquelles M. Hodgkinson s'est livré, et qu'il a résumées dans son ouvrage, on lui doit le plus grand nombre de celles qui ont été faites tant lors de l'enquête anglaise qu'à propos de la construction des ponts tubulaires. Ces expériences ont été accomplies avec un soin, une habileté, qui appellent sur les résultats une confiance sans réserve. Les formules de M. Hodgkinson s'adaptent aussi très bien à ses expériences ; seulement, on pourrait peut-être faire le reproche à quelques unes d'entre elles, celles des piliers, par exemple, de n'avoir pas une forme assez pratique. Tout en traduisant fidèlement ces dernières, j'en ai donné d'autres, que les praticiens trouveront, je l'espère, plus commodes. En général, je me suis peu attaché à conserver les formules anglaises, qui sont établies dans un esprit différent de celles en usage dans notre pays. Ces formules sont trop spéciales et exigeraient

(1) Je saisis cette occasion pour recommander cette bibliothèque aux ingénieurs, tant pour les ouvrages excellents que l'on y trouve et qui concernent particulièrement notre art, qu'en raison du bon accueil et de l'extrême complaisance des employés. Ce sont là deux avantages que l'on ne voit pas souvent réunis dans ces sortes d'établissements ; et il n'est que juste d'en signaler les trop rares exemples.

souvent de nouvelles expériences pour être appliquées. Or, les expériences coûtent cher en France, et il y avait un grand intérêt à tirer de celles faites en Angleterre un parti tel, que l'on pût, dans la plupart des cas, se dispenser d'en faire de nouvelles : c'est ce que j'ai tenté. C'est aussi dans ce but que j'ai essayé de soumettre à des règles fixes la résistance des piliers creux, carrés ou rectangulaires, des poutres creuses en tôle, etc., que les expérimentateurs anglais avaient cru n'être soumise à aucune loi. La lecture de ce mémoire montrera jusqu'à quel point j'ai réussi dans cette entreprise; et peut-être, au moins, fera-t-elle naître dans l'esprit d'autres ingénieurs, poursuivant le même but, l'idée de suppléer à ce que mon travail peut présenter de défectueux et d'imparfait.

CHAPITRE I.

DU FER ET DE LA FONTE SOUMIS A DES EFFORTS DE TRACTION.

6. Afin d'établir nettement la part de lumières nouvelles que les expérimentateurs anglais ont apportée dans la question de la résistance du fer et de la fonte, je rappellerai en quelques mots où en était cette question à l'époque où ils ont commencé leurs expériences. Je ferai d'abord remarquer, en termes généraux, qu'il n'existait, à proprement parler, aucune expérience capable de soulager le praticien de la crainte bien fondée que lui inspiraient les formules théoriques; et, en ce qui concerne le paragraphe actuel, on peut dire qu'il était généralement admis par les ingénieurs :

1° Que dans certaines limites le fer et la fonte, sous l'action de charges croissantes, s'allongeaient régulièrement et proportionnellement à la charge;

2° Qu'il existait un point appelé *limite d'élasticité* où cette loi cessait d'exister, et où l'allongement s'effectuait dans une proportion plus rapide que la charge; en outre, à partir de ce

point, le métal conservait un allongement permanent, c'est-à-dire que, la charge étant enlevée, il ne revenait pas à sa longueur primitive;

3° Que, sous la même charge, le fer s'allongeait plus que la fonte (1);

4° Sans que cela fût parfaitement reconnu, j'ajouterai qu'il y avait une tendance générale à croire que dans la deuxième phase de l'élasticité du métal il existait un point, encore assez éloigné de celui où se produit la *rupture instantanée*, où l'action de la charge, prolongée pendant un certain temps, augmentait sans cesse l'allongement primitivement observé, et finissait par provoquer la rupture;

5° Enfin, on admettait que la résistance du fer et de la fonte dans des échantillons du même calibre, mais de provenances diverses, variait assez peu pour adopter *une moyenne de résistance.*

Aujourd'hui, un grand nombre d'expériences concluantes permettent de rectifier la plupart des formules fournies par la théorie et de les suppléer au besoin; en outre elles modifient, comme il suit, les idées que l'on s'était formées sur l'allongement du fer et de la fonte :

Premièrement. — La proportionnalité entre l'allongement et la charge n'existe pas. (Je dois dire, cependant, qu'en pratique on peut, sans erreur sensible, affirmer cette loi pour le fer pour des charges comprises entre 0 et la moitié de celle qui produirait la rupture instantanée).

---

(1) On trouve dans les divers auteurs qui ont traité de la résistance des matériaux que, le *module d'élasticité* du fer étant représenté par 20 000, celui de la fonte l'est par 12 000 seulement. Ce qui signifie, *pour les savants*, que la fonte sous le même poids s'allonge environ une fois et demie plus que le fer. Malheureusement cette expression, *module d'élasticité*, est si vague, et souvent traduite en termes si peu compréhensibles, que, malgré les résultats que je viens de rapporter dans cette note, une opinion contraire au fait qu'ils indiquent s'est généralement accréditée chez les praticiens.

Secondement. — Un allongement permanent se manifeste sous les plus petites charges : par conséquent il n'y a pas de *limite d'élasticité*, et les formules qui fixent cette limite sont nécessairement fausses.

Troisièmement. — Sous la même charge, la fonte s'allonge beaucoup plus que le fer.

Quatrièmement. — Le fer et la fonte, soustraits aux chocs ou aux vibrations, supportent indéfiniment les charges les plus voisines de celles capables de produire *la rupture instantanée.*

Cinquièmement. — Les écarts considérables de résistance observés sur les échantillons de fer ou de fonte de même calibre, mais de provenances diverses, ne permettent en aucune façon de compter sur une *moyenne de résistance.* Il en résulte que, lorsqu'on ne connaît pas la résistance particulière du métal dont on dispose, la prudence conseille d'adopter le taux minimum de résistance fourni par l'observation.

Enfin j'ajouterai, en ce qui concerne le fer, que, suivant l'opinion d'ingénieurs très distingués, au nombre desquels figure M. Brunel fils, la structure cristalline ou fibreuse de la cassure ne serait pas un indice certain, absolu, de la qualité et de la force du métal. M. Brunel a, en effet, entretenu la commission d'enquête d'expériences fort intéressantes dans lesquelles il avait produit à volonté dans la même barre une cassure présentant tour à tour l'aspect cristallin ou fibreux.

Allongement du fer et de la fonte.

7. M. Hodgkinson a déduit de ses expériences (1) sur des fontes diverses, mais dont la résistance par cent. q. s'éloigne

(1) Pour rendre les allongements plus sensibles, M. H. a opéré sur des barres de 50 pieds de longueur, en trois parties, assemblées par deux manchons filetés. Ces barres étaient suspendues au comble d'un hangar fort élevé, et portaient, fixé à leur partie supérieure seulement, un appareil fort simple, et destiné à mesurer les allongements obtenus sous des charges croissantes jusqu'à la rupture.

peu de 1100 kil., une formule reliant l'allongement à la charge qui le produit et à la longueur de la barre. Cette formule, transformée de manière à ce que le poids soit exprimé en kilogrammes et la longueur en centimètres, est la suivante :

$$P = 969\,568\,\frac{a}{L} - 188\,500\,268\,\frac{a^2}{L^2}. \qquad (1)$$

On en tire la valeur de l'allongement, connaissant le poids :

$$a = L(0.002\,571\,794 - \sqrt{0.000\,006\,614\,12 - 0.000\,000\,005\,305\,03P}). \qquad (2)$$

8. Pour l'allongement du fer, le résultat obtenu par M. Hodgkinson s'écarte peu de celui fourni par Duleau. Voici quelle est la formule qui exprime l'allongement a produit dans une barre de longueur L par un poids P :

$$a = \frac{PL}{1\,934\,565}. \qquad (3)$$

D'après Duleau, pour un fer doux de bonne qualité, le dénominateur serait 2000000.

Les barres de fer expérimentées par M. Hodgkinson avaient, comme pour la fonte, 2 cent. 1/2 de côté en section et 50 pieds de longueur. En janvier 1835, M. Bornet avait fait, à l'usine de Guérigny, des expériences semblables sur des barres de 6 m. de longueur, mais d'un calibre beaucoup plus fort. Ces barres avaient en effet 5 à 6 cent. de côté en section. Les expériences de M. Bornet, quoique incomplètes, confirment une partie des résultats trouvés par M. Hodgkinsen. Les barres de l'expérimentateur français se sont allongées beaucoup moins. Ainsi la formule qui, dans ce cas, donnerait l'allongement en fonction du poids et de la longueur serait

$$a = \frac{PL}{2\,851\,404}. \qquad (4)$$

On ne peut cependant déduire de là, d'une manière absolue, que les gros fers s'allongent moins que les fers moyens; il faudrait pour cela que les expériences de MM. Bornet et Hodgkinson eussent été faites sur des barres d'une même pro-

venance. Cependant l'allongement du fil de fer, qui est encore plus grand que celui du fer d'un calibre moyen, vient appuyer cette opinion que l'allongement pour un même poids est en sens inverse du calibre; car la formule de l'allongement que j'ai tirée des expériences de M. Leblanc, ingénieur en chef des ponts et chaussées, est :

$$a = \frac{PL}{1158\ 240}. \qquad (5)$$

Il s'ensuivrait que le fil de fer s'allongerait deux fois autant que le fer d'un calibre moyen, et près de trois fois autant que le gros fer carré de 5 à 6 cent. de côté.

Je ferai remarquer que cette dernière formule est celle qui donne l'allongement du fil de fer à partir d'une charge égale à 0, comme pour le fer en barres (1). Or, la longueur du fil de fer correspondant à une charge nulle n'est pas connue directement. On part toujours, en pratique, d'une longueur l, qui est celle qui résulte d'une tension initiale P', sous laquelle le câble est formé. L'allongement a', correspondant à cette tension, est donné d'abord par la formule :

$$a' = \frac{P'(l-a')}{1158\ 240} \text{ d'où } a' = \frac{P'l}{1158\ 240 + P'}.$$

Remplaçant alors, dans la formule (5), L par sa valeur $l-a'$, on en tire finalement l'allongement réel du câble et par suite sa longueur totale, $L+a$, sous la charge permanente P par cent. q. qu'il serait appelé à supporter.

9. Si, au moyen des formules (2) et (3), et pour mieux juger de la différence qui existe dans les quantités dont le fer en barres et la fonte s'allongent pour un même poids, on recherche les allongements qu'éprouveraient deux barres de ces métaux

---

(1) C'est afin de rendre comparables les allongements du fer sous une même charge, quel que soit le calibre sous lequel il se présente.

ayant 10 m. de longueur et 1 cent. carré de section sous une charge de 1000 kil., on trouve :

Pour la fonte $a = 1^{c}.373$ ou $\frac{1}{730}$ de la longueur de la barre,

Pour le fer $a = 0.516$ ou $\frac{1}{1934}$ id id.;

d'où l'on voit que la fonte, près de la limite de sa résistance, s'allonge près de trois fois autant que le fer sous la même charge.

Résistance finale du fer et de la fonte à la rupture par traction.

10. La résistance de la fonte à la rupture par traction varie dans des limites extrêmement étendues. Ainsi, dans les expériences (1) de M. Hodgkinson sur les dix-sept espèces de fontes dont il est question dans le rapport de la commission d'enquête anglaise, le plus faible échantillon s'est rompu sous une charge de 777 kilog. par cent. quarré; le plus fort, sous une charge de 1811 kilog. Un écart à peu près semblable avait été observé antérieurement par le même expérimentateur sur onze autres espèces de fonte. La moyenne générale de la résistance de toutes ces fontes est d'environ 1100 kilog. Il est probable qu'en France, où une grande quantité de fonte est encore obtenue au combustible végétal, l'écart entre les résistances *maxima* et *minima* est encore plus grand. Quant à la résistance moyenne, autant que l'on peut en juger d'après les seules expériences un peu étendues qui aient été faites, par MM. Minard et Desormes en 1815, il ne paraît pas qu'elle soit supérieure à

(1) Ces expériences ont été faites sur des barreaux de 60 cent. de longueur et de 7 cent. quarrés de section, présentant diverses formes de section. Il ne paraît pas que cette forme ait aucune influence sur la résistance. En outre, en comparant les résultats de ces expériences à ceux obtenus accidentellement dans les expériences sur l'allongement (barres de $15^{m}.45$ de longueur), on ne trouve pas non plus que la longueur ait pour effet de diminuer la résistance.

celle obtenue par M. Hodgkinson sur les fontes anglaises (1).

11. On voit donc que l'on ne peut guère, en pratique, compter sur une *moyenne générale de résistance* pour toutes les fontes d'un pays. Il serait donc fort à désirer que l'on profitât en France du corps si distingué des ingénieurs des mines, et de la protection accordée à l'industrie du fer par l'état, pour déterminer, aux frais des maîtres de forges, la résistance des fontes produites dans chaque usine, ou tout au moins dans chaque district où le minerai, le combustible et les circonstances de la fabrication seraient les mêmes (2). Pour répondre à l'objection, que l'on pourrait me faire, que ce travail serait sans utilité, par la raison qu'il existe aussi de grandes variations dans les résistances offertes par des échantillons d'une même fonte et provenant de la même coulée, je dirai : qu'ayant examiné le détail des expériences de M. Hodgkinson sur la traction et la compression, et dans lesquelles trois à six échantillons d'une même fonte avaient été rompus, j'ai trouvé que le plus grand écart entre les résistances de divers échantillons d'une même qualité de fonte n'était au *maximum* que du cinquième environ du plus faible échantillon, et au *minimum* du trentième; ce qui est bien loin de la différence du simple au triple que l'on a dû remarquer dans les résultats extrêmes de M. Hodgkinson rapportés tout à l'heure et qui ont été obtenus sur des fontes de provenances diverses.

---

(1) Il est question dans le rapport de la commission anglaise d'un mélange d'un fer malléable et de fonte imaginé par M. Stirling, et dont la résistance moyenne l'emporterait de 50 à 60 p. 100 sur celle des fontes ordinaires. Ainsi la meilleure qualité de ce mélange a fourni une résistance moyenne à la traction de 1810^k, les résultats extrêmes étant 1600 et 2100 kilogrammes. Ce métal mixte conserve cet avantage sur la fonte ordinaire sous le rapport de ses résistances à la compression et à l'effort transversal.

(2) Je donne à la fin de ce Mémoire le modèle d'un tableau qu'il s'agirait de remplir pour arriver à connaître d'une manière aussi complète qu'il est utile la résistance des diverses fontes du pays, et les circonstances capables d'influer sur cette résistance.

Pour clore cette analyse, je ferai remarquer que l'observation relative à la variation de résistance entre divers échantillons d'une même espèce de fonte est très importante, à mon avis, *en ce qu'elle donne la mesure du degré d'approximation que l'on est en droit d'attendre d'une formule pratique.*

12. J'ajouterai encore, sur la résistance de la fonte à la traction, une dernière observation : c'est que l'on trouve dans les traités français les plus récents sur la matière (*Mécanique industrielle* de M. Poncelet ; *Aide-Mémoire* de M. Claudel) deux espèces de résistance à la traction : celle déterminée par l'expérience directe, que l'on trouve cotée à 1300 kil. en moyenne, et qui n'entre dans aucune formule ; celle de 2800^k par cent. q., déterminée par Navier d'une manière indirecte, par la rupture de barreaux par effort transversal, et qui représente la valeur de T dans la formule connue $PL = \frac{1}{6} T\overline{EH}^2$.

Il n'est fait mention de cette contradiction dans aucun des traités mentionnés ci-dessus, comme si c'était la chose du monde la plus naturelle. Cela tient-il à ce qu'il aurait fallu pour cela modifier la formule théorique et reconnaître en quelque sorte que la théorie générale de la résistance des matériaux, telle qu'elle existe aujourd'hui, est impuissante à rendre un compte exact des faits? Il faut pourtant bien en prendre son parti et avouer que le plus souvent la théorie, avec les hypothèses régulières et irréalisables sur lesquelles elle s'appuie, n'a pas d'autre avantage que de dispenser les savants d'étudier à fond, par l'observation, les propriétés réelles des matériaux ; mais qu'elle a, en revanche, le funeste inconvénient d'exposer les praticiens aux plus graves mécomptes.

13. *Le fer* n'offre pas plus de régularité que la fonte dans sa résistance finale. D'après Rondelet et Soufflot, cette résistance varierait entre 1810^k et 9230^k par cent. q. On ne connaît aujourd'hui que le meilleur fil de fer qui atteigne cette dernière limite, et je ne pense pas que le meilleur fer en barres obtenu au charbon de bois dépasse 6000 kil. En prenant ce dernier chiffre

comme la limite supérieure du fer en barres, on voit que l'écart entre les résistances *maxima* et *minima* du fer serait encore plus grand que pour la fonte. Mais si la résistance maximum du fer au charbon de bois est tombée de nos jours à 6000 kil., les procédés chimiques de la fabrication étant restés les mêmes, ne semble-t-il pas, à moins que les résultats fournis par Rondelet et Soufflot n'aient été exagérés, que les nouveaux procédés mécaniques, plus expéditifs et plus économiques, ont pour effet d'énerver le métal? D'un autre côté, l'introduction dans les hauts fourneaux du coke à la place du charbon végétal paraît encore avoir aggravé l'état des choses, puisqu'il résulterait d'un mémoire de M. Em. Martin (*Annales des Ponts-et-Chaussées*) que la résistance moyenne des meilleurs fers à câbles laminés fabriqués au coke n'excéderait pas 3300 kil. Je ne sais si cette double observation a déjà été faite, mais elle me paraît, dans tous les cas, de nature à mériter l'attention des hommes pratiques.

14. M. Stephenson a trouvé comme Navier une différence notable entre les résistances présentées par la même tôle, selon qu'elle est tirée dans le sens de ses fibres ou dans le sens perpendiculaire. Ainsi les résultats obtenus sur des tôles de 1c.27 à 1c.64 employées dans les ponts tubulaires ont été

de 3137 kil. par c. q. dans le sens du laminage,
de 2640 id. dans le sens perpendiculaire.

Quelques unes des tôles expérimentées ont offert une cassure cristalline, d'autres une cassure fibreuse; et, malgré ces aspects divers, les tôles ont présenté dans leur résistance une égalité remarquable.

Les résultats obtenus par Navier sont plus élevés (4100 et 3600); mais on ne sait pas sur quelles épaisseurs de tôle il a opéré.

Dans un mémoire récent adressé à l'Académie des sciences, M. Fairbairn prétend que ces différences ne s'observent que dans les tôles fabriquées par un procédé défectueux. Il rapporte

à l'appui de son assertion, des expériences sur des tôles qui ont donné les mêmes résultats dans les deux sens.

15. *Traction oblique.* M. Hodgkinson a trouvé par expérience que, si l'on tirait une pièce de fonte de manière à ce que la direction de la force, au lieu d'être dans l'axe de la pièce, fût suivant l'une des faces du solide, la résistance était diminuée des deux tiers.

De la résistance à la rupture par traction du fil de fer simple et sous la forme de câbles.

16. Le fil de fer de 3^{mm} à 3^{mm} 1/2 de diamètre employé dans les ponts suspendus présente une résistance qui, de même que le fer en barres, varie aussi beaucoup suivant les usines dont il provient. A l'origine de la construction des ponts suspendus, quand aucune prescription administrative ne limitait l'effort maximum qu'il devait supporter, on ne fabriquait guères et l'on n'employait que du fil d'une qualité supérieure et offrant une résistance variant de 78 à 90 kil. par millimètre carré. Plus tard, des accidents étant survenus, et ces accidents ayant été attribués à ce que l'on avait fait supporter aux fils une charge trop forte, l'administration supérieure crut y mettre un terme en limitant à 18 kil. l'effort maximum que l'on pourrait imposer au fil de fer. Mais il est évident qu'une pareille prescription, qui ne tenait nul compte de la qualité du métal, devait avoir pour effet d'encourager la fabrication et l'emploi de fils d'une qualité inférieure, et c'est ce qui arriva. M. Vuignier, dans son rapport à la Société des ingénieurs civils sur la chute du pont d'Angers, mentionne en effet ce fait important: c'est que, depuis l'adoption officielle du chiffre de 18 kil., on n'emploie généralement dans la construction des ponts suspendus que du fil de qualité médiocre et pouvant à peine supporter 50 kil. par mil. q. Ce fil a le double avantage, pour le spéculateur, de satisfaire d'abord à la prescription administrative tout aussi bien que le meilleur fil de fer, et ensuite de

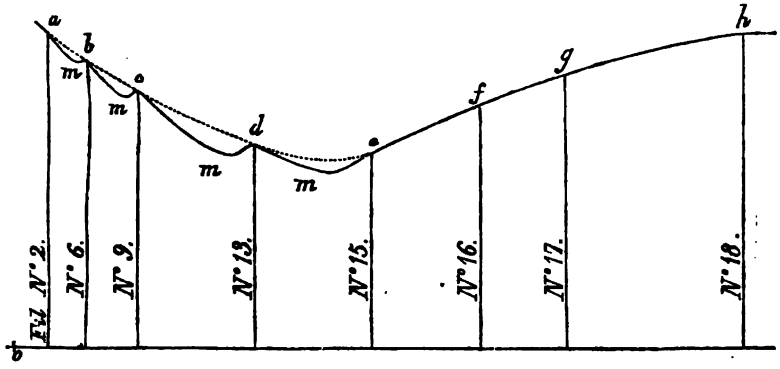
lui coûter 15 à 20 francs de moins par quintal. Il est clair que, dans cette circonstance, la sécurité publique est sacrifiée à l'avidité des spéculateurs, et que l'administration ne saurait revenir trop tôt sur une mesure qui conduit à un but diamétralement opposé à celui qu'elle s'était proposé d'atteindre.

17. A part les variations de résistance qui tiennent à la qualité du métal, les fils de fer d'une même provenance, mais de calibres différents, présentent une particularité extrêmement curieuse et qui a été signalée pour la première fois par M. Seguin aîné. Je veux parler de l'existence de plusieurs *maxima* de résistance offerts par des fils variant en diamètre depuis un demi millimètre environ jusqu'à six. Cette particularité est fort connue de tous les ingénieurs ; mais je crois devoir entrer dans quelques détails à son sujet, parce que je ne l'envisage pas de la même manière que l'expérimentateur.

Voici d'abord le tableau des expériences de M. Seguin sur des fils de fer de la manufacture de la veuve Fleur de Besançon :

1 Nos des fils.	2 Diamètre en millim.	3 Poids total soutenu.	4 Ténacité par millim. quarré.	Observations.	1 Nos des fils.	2 Diamètre en millim.	3 Poids total soutenu.	4 Ténacité par millim. quarré.	Observations.
		kil.	kil.				kil.	kil.	
1	0.6188	25.96	86.11	Doux.	13	1.800	145.50	57.18	
2	0.7078	34.25	86.96	Doux.	14	2.072	166.50	49.32	Très doux, sans ressort.
3	0.7587	34.12	80.84	Cassant.					
4	0,8380	42.30	76.61	Cassant.	15	2.226	202.00	51.96	
5	0.9115	47.25	72.34	Très cassant.	16	2.489	311.00	63.67	Très doux.
					17	2.696	1389.00	68.15	Pailleux.
6	1.022	62.56	76.06						
7	1.060	65.25	71.21		18	3.067	617.00	84.00	
8	1.123	66.75	67.28	Très cassant.	19	3.492	750.00	78.23	
					20	4.140	874.75	65.74	
9	1.293	91.74	69.77	Assez cassant	21	4.812	1138,00	62.52	
10	1.436	105.00	64.84	Très doux.					
11	1.476	109.25	58.56	Très doux.	22	5.449	1579.00	67.66	Très cassant.
12	1.691	124.80	55.52		23	5.942	1738.50	62.63	Doux.

18. En examinant attentivement les résultats ci-dessus (4e colonne), on voit qu'ils peuvent se diviser par groupes de 2, 3 ou 4, offrant tous, un seul excepté, le même caractère. Ainsi, dans chacun, la ténacité du fil de fer va en diminuant du pre-



mier au dernier, et le dernier de chaque groupe est inférieur au premier du groupe suivant; de sorte que, si l'on veut représenter par une courbe ces diverses évolutions, en portant en abscisses les sections des fils, en ordonnées les résistances correspondantes, on obtient une ligne d'une forme ondulée (fig. ci-dessus) passant par les points *a*, *b*, *c*, *d*, qui correspondent à autant de *maxima* dans la résistance des fils de fer.

Mais, à partir du fil n° 15, cette forme ondulée cesse, et la ligne remonte régulièrement vers le n° 18, appartenant à un nouveau maximum qui se rapproche beaucoup du premier, inférieur à celui-là, mais supérieur à tous les autres. Il est digne de remarque que, si l'on joint entre eux les divers *maxima*, comme l'indique la ligne ponctuée, on obtient une courbe générale *abcdefgh*, ayant sensiblement la même forme que les courbes *amb*, *bmc*, etc., qui se produisent entre les *maxima* intermédiaires. J'ajouterai qu'au delà du n° 18, une grande courbe, comme celle qui réunit tous les *maxima* intermédiaires, mais plus allongée, se reproduit de nouveau. On peut en

tirer cette induction : qu'il y a quelque probabilité que, si l'on expérimentait sur une série de fils allant en grossissant jusqu'à la dimension des fers marchands, on obtiendrait une série de courbes générales analogues à la courbe *abcdefgh* et à la suivante, possédant chacune un grand maximum, comme les fils n^os^ 2, 18 et 62, et entre ceux-là un certain nombre de *maxima* intermédiaires.

Cette succession de courbes représenterait la loi de la résistance du fer à la traction suivant le calibre; et l'on conçoit que, si une telle loi existe réellement, il appartient surtout au fil de fer de la révéler, puisque c'est sous cette forme que le fer possède au plus haut degré les qualités qui lui sont propres. On voit que cette loi consacrerait ce fait général, qui a été pressenti plutôt que démontré : que la résistance du fer diminue à mesure que le calibre augmente, mais d'une manière qui ne ressemble en rien aux lois connues jusqu'ici.

Cette allure particulière de la résistance du fer pourrait s'expliquer par le nombre et la forme des molécules, et la disposition qu'elles devraient affecter pour former telle ou telle section. Ainsi, par exemple, les *maxima* correspondraient aux cas où les molécules entreraient en contact ou rapprochement par leurs faces les plus larges, d'où résulterait naturellement une force adhésive plus considérable.

D'après M. Seguin, le dernier terme de chaque groupe serait une anomalie. Il appartiendrait à un fil trop étiré sans recuit, ou à un fil recuit qui n'aurait pas éprouvé un étirage suffisant. Il me semble que c'est attribuer au hasard une série de faits trop réguliers, trop bien caractérisés. D'ailleurs, cette hypothèse ne rend pas compte de la physionomie du cinquième groupe, qui est toute différente des autres, et laisse sans explication les *maxima* généraux des n^os^ 2, 18 et 22. Or, si l'on admet, ce qui me paraît incontestable, car les expériences de M. Seguin ont été confirmées par celles de M. Dufour, à Genève, que les *maxima* généraux sont les signes d'une loi générale et régulière de la résistance du fil de fer, il n'en coûte pas

plus d'admettre, et cela paraît à la fois plus naturel et plus raisonnable, qu'il en est de même des *maxima* intermédiaires.

19. Dans un mémoire destiné à mettre succinctement sous les yeux du praticien tous les faits, tant anciens que nouveaux, qui peuvent l'intéresser, je ne puis omettre de dire quelques mots de l'action prolongée de la charge sur le fil de fer. En ceci, le fil de fer diffère complétement du fer en barres. On a vu, en effet, que ce dernier, soustrait aux chocs et aux vibrations, supportait indéfiniment les charges les plus voisines de celles capables de produire la rupture instantanée, sans s'allonger plus qu'il ne l'avait fait peu de temps après l'application de la charge. Il résulte, au contraire, d'expériences de M. Vicat, prolongées pendant trois ans, que le fil de fer chargé au delà du quart de son poids de rupture instantanée, s'allonge indéfiniment et doit par conséquent finir par se rompre. Ce fait seul constituerait le fil de fer dans un état d'infériorité très grand relativement au fer en barres, si M. Leblanc, ingénieur en chef des ponts et chaussées, n'avait montré, par des expériences continuées pendant trois mois, que, s'il est vrai de dire que le fil de fer s'allonge indéfiniment sous une certaine charge, d'un autre côté il ne perd absolument rien de sa ténacité par l'action prolongée pendant plusieurs jours d'une charge même voisine de celle de rupture. Or, comme le fait justement remarquer cet ingénieur, cette propriété est équivalente, en pratique, à celle qui permettrait au fil de fer de supporter ladite charge indéfiniment, parce que la charge maximum d'un pont suspendu n'est que momentanée, et que la charge permanente, qui ne se compose guère que du poids de la construction elle-même, n'atteint jamais le quart de la charge de rupture. Il s'ensuit que, dans la comparaison que l'on peut avoir à faire sur les avantages respectifs du fil de fer et du fer en barres, on peut négliger la question de l'action prolongée de la charge et n'avoir égard qu'à leurs résistances momentanées.

20. Il me reste maintenant à parler de la résistance des fils de fer sous la forme de câbles. Il y a sur ce sujet deux questions à résoudre : *premièrement*, la résistance d'un câble fabriqué et tiré en ligne droite est-elle égale à la somme des résistances des brins dont il se compose? et *secondement*, quelle portion de sa résistance peut perdre un câble fabriqué en ligne droite par la forme curviligne qu'il prend lorsqu'il est mis en place et par la manière dont la charge transmet l'effort de traction? Sur la première question, si l'on s'en rapporte à l'expérience faite par M. Seguin aîné, on répond affirmativement. Malheureusement cette expérience n'a pas été faite dans les conditions ordinaires de la fabrication d'un câble et ne prouve absolument rien. M. Leblanc a comblé cette lacune, en expérimentant sur onze câbles de 20 mètres de longueur, fabriqués par les diverses méthodes qui ont été mises en pratique par MM. Seguin, Vicat et Leblanc, et il a tiré de ses expériences les conclusions suivantes :

1° Il y a avantage à multiplier les ligatures et à les faire serrées; il vaut même mieux les faire continues.

2° Les différentes méthodes que l'on peut employer pour fabriquer les câbles ne font gagner que peu de chose sur la quantité de force que perdent les fils quand ils sont réunis en câbles.

3° Cependant, il y a avantage à régler la tension au moyen d'un poids et à prendre les autres précautions indiquées par M. Vicat.

4° Il y a plus d'avantage encore à ajouter à ces soins une tension préalable, surtout d'environ 500 kilogrammes pour le fil de 3 à 3 mill. 1/2.

La perte de résistance est de 15 à 20 p. 100, suivant que l'on emploie l'une ou l'autre méthode. En somme, les avantages que l'on retire des précautions indiquées par MM. Vicat et Leblanc sont si faibles, qu'il me paraît plus sage d'employer la méthode la plus simple, celle de M. Seguin, et de compter sur une perte de 20 p. 100.

21. Dans son rapport sur les ponts suspendus du Rhône (*Annales des ponts-et-chaussées*, 1831), M. Vicat cite trois ponts, ceux de Fourques, de Ferrières et de Tarascon, dans lesquels la différence du parcours des brins due à la forme curviligne des câbles est telle que, d'après son calcul, *la perte de résistance* qui en résulte doit s'élever à 20 p.100. Mais je ferai remarquer que ce calcul est fondé en partie sur une hypothèse qui peut très bien ne pas se réaliser; et l'on est d'autant plus fondé à le craindre, que les démentis donnés par l'expérimentation pure à la théorie sont nombreux. On pourrait peut-être s'en tenir à l'estimation ci-dessus, si l'on avait quelque bonne raison de croire que la perte en question est négligeable, ou peut le devenir à l'aide de quelque artifice de construction; mais il s'en faut de beaucoup qu'il en soit ainsi. Pour ma part, je ne serais nullement étonné que l'expérience vînt un jour démontrer qu'un câble en place n'a pas la moitié ou même le tiers de la résistance qu'on lui attribue; car il me paraît être dans les choses possibles, et même probables, que l'inégalité de tension qui doit résulter à la fois, et de la forme curviligne du câble, et de la manière dont la charge s'y rattache, place ce câble dans la position de la barre expérimentée par M. Hodgkinson (§ 15). S'il en était ainsi, et avec les fils de qualité inférieure que la spéculation privée a été conduite à adopter par la réglementation administrative, il s'ensuivrait qu'un pont suspendu supportant sa charge maximum serait bien près de rompre, et devrait rompre infailliblement pour peu que cette charge fût animée d'un mouvement oscillatoire vertical, comme celui qui se produit par le passage des troupes.

M. Vuignier a dit, à propos du pont d'Angers, que la rupture du câble avait été accompagnée d'un bruit sourd, tout à fait analogue *à un feu de peloton mal nourri*. Cette expression est extrêmement significative; elle indique clairement la grande inégalité de tension qui régnait dans les fils du câble; et ce fait, joint aux raisons qui précèdent, démontre combien il est

important, indispensable, de recourir à l'expérience pour résoudre la question dont il s'agit.

L'importance de cette question est encore démontrée par la manière toute particulière dont s'en sont préoccupés presque tous les ingénieurs qui ont construit des ponts suspendus. Ainsi M. Vicat, après avoir indiqué des moyens qui, selon lui, devaient parer à l'inégalité de tension, n'en poursuit pas moins la recherche de moyens plus efficaces; ce qui prouve que sa confiance dans ceux qu'il avait d'abord indiqués n'était pas bien grande; et il propose de faire des câbles carrés, composés de nappes indépendantes, dont les longueurs seraient calculées suivant la place qu'elles devraient occuper. M. Chaley, l'ingénieur du pont de Fribourg, imagine de fabriquer les câbles à la place même qu'ils doivent occuper. Les ingénieurs des ponts de la Roche-Bernard, de Saint-Christophe, suivent cet exemple. Mais il n'est pas du tout démontré que ces moyens indiqués, ou employés, assurent l'égalité de tension qu'ils sont destinés à obtenir; et ils ne peuvent, en aucune façon, dispenser d'avoir recours à l'expérimentation.

22. Dans les ponts suspendus dont les chaînes sont en fer en barres, il n'existe aucune incertitude du genre de celle dont il vient d'être question pour le fil de fer. Dans ces ponts, la charge se rattache à la chaîne par un goujon qui est exactement dans l'axe du chaînon; de sorte que l'on est assuré que ce chaînon est tiré bien régulièrement, et par conséquent que toutes les parties de sa section concourent également à sa résistance. Mais ces ponts ne peuvent être regardés comme meilleurs que ceux en fil de fer qu'à la condition que les chaînons ne soient pas, comme dans le pont des Invalides, composés de plusieurs pièces rapportées et soudées. On peut signaler comme la meilleure disposition qui ait été adoptée jusqu'ici celle des chaînons plats des ponts suspendus de Peath et de Hungerford, dans lesquels les têtes et la tige ont été formées d'une seule pièce au laminoir et les trous faits à la machine à percer.

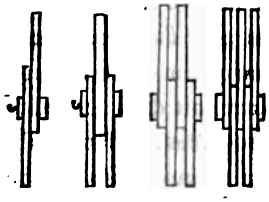
De la résistance à la traction du fer assemblé par des boulons ou des rivets, et accessoirement de la résistance au cisaillement.

23. Lorsque deux pièces de tôle sont assemblées au moyen d'un boulon suffisamment serré, comme l'indique le croquis ci-contre, ce boulon n'est pas, comme on l'a cru long-temps, dans le cas d'un solide encastré par une extrémité et sollicité en un point de sa longueur par un effort transversal; car le contact parfait des deux tôles l'empêche complétement de fléchir comme un solide placé dans cette condition. Il est évident qu'il ne peut céder que par le glissement l'une sur l'autre des deux tranches de molécules séparées par le plan de contact des deux tôles; et que, par conséquent, les deux feuilles de tôle jouent à l'égard du boulon le rôle d'une *cisaille*. Il est donc assez naturel d'appeler *résistance au cisaillement* le genre de résistance que le boulon oppose à l'effort auquel il est soumis dans cette circonstance.

On a cherché pour la première fois, en Angleterre, à l'occasion des ponts tubulaires de M. Stephenson, à déterminer par expérience la valeur de la résistance au cisaillement. Les expériences qui ont été faites laissent beaucoup à désirer; cependant on peut, avec sécurité, en tirer les conclusions suivantes :

1° La résistance au cisaillement d'un boulon ou d'un rivet est égale environ aux trois quarts de sa résistance à la traction.

2° Cette résistance est proportionnelle au nombre de sections offertes au cisaillement.

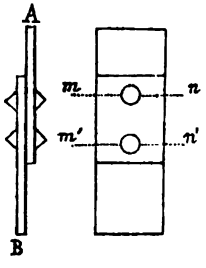


D'après cela, si l'on désigne par R la résistance totale d'un boulon au cisaillement, T sa résistance à la traction par cent. quarré, S sa section, n le nombre d'épaisseurs de métal traversées, il est facile de se

rendre compte que, dans les différentes combinaisons représentées dans les croquis ci-dessus, la résistance du boulon est :

$$R = 0.75\,ST(n-1).$$

24. Lorsque la tôle, au lieu d'être assemblée par des boulons, l'est au moyen de rivets, ces rivets, en se refroidissant, produisent un serrage assez énergique, et le frottement qui en résulte s'ajoute naturellement à la résistance du rivet au cisaillement, puisque ce cisaillement ne peut s'effectuer sans que les deux surfaces de tôle en contact glissent l'une sur l'autre. D'après les expériences rapportées par M. Edwin Clark, le surcroît de résistance qui en résulterait serait d'environ 230 k. par cent. quarré de section de rivet. On a fort exagéré l'influence de ce serrage sur la résistance d'un assemblage. Ainsi, M. Clark affirme, à la page 396 de son ouvrage, que l'on peut arriver dans beaucoup de cas, par une rivure judicieuse et bien faite, à compenser complétement, par le frottement dû à la contraction des rivets, la perte occasionnée par le percement des trous dans la tôle. Mais on peut s'assurer, au moyen du chiffre de 230 k. que je viens de rapporter, qu'il faudrait, pour obtenir un pareil résultat, que la tôle fût extrêmement mince par rapport au diamètre du rivet, et ce rivet aurait alors un surcroît de résistance au cisaillement très grand. Je crois qu'il est plus simple et plus sûr de ne pas compter sur le frottement, et de proportionner l'épaisseur de la tôle et le diamètre du rivet comme s'il n'existait aucun serrage.



25. Partant de là, je suppose qu'il s'agisse de déterminer le diamètre d qu'il convient d'adopter pour deux rivets réunissant deux plaques de tôle A et B, dont l'épaisseur e et la largeur l sont connues. Pour cela, on remarquera d'abord que, pour que l'assemblage soit dans les meilleures conditions possibles, il faut qu'il soit prêt à céder en même temps par le

cisaillement des deux rivets et par la rupture des feuilles dans les sections mn, $m'n'$, où elles sont affaiblies par des trous de rivets. Si l'on désigne par R et R′ ces deux résistances respectivement, par T et T′ les résistances à la traction par cent. quarré du rivet et de la tôle, par N le nombre de rivets à couper, par S et d la section et le diamètre du rivet, on a :

$$R = 0{,}75.S.T.N,$$
$$R' = T'e(l-d);$$

d'où l'on tire, en posant $R = R'$,

$$d = -\frac{T'e}{2D} + \sqrt{\frac{Tel}{D} + \left(\frac{T'e}{2D}\right)^2}, \qquad (7)$$

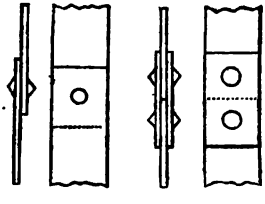
formule (*) dans laquelle $D = 0{,}58875\,TN$. La désignation D n'a été introduite dans la formule que pour la rendre plus simple à écrire.

Au lieu de N, il faudrait mettre 2N, 3N, si, par la nature de l'assemblage adopté, chaque rivet offrait au cisaillement deux ou trois sections au lieu d'une.

Il peut arriver qu'au lieu de se donner le nombre de rivets, on en fixe le diamètre. On tire alors des deux mêmes équations ci-dessus le nombre convenable de rivets à adopter pour satisfaire à la condition d'égale résistance entre les rivets et les feuilles de tôle, et l'on a :

$$N = \frac{T'e(l-d)}{0.58875\,Td^2}. \qquad (8)$$

26. Toutes les dispositions que l'on peut adopter pour assembler deux feuilles de tôle simples au moyen de rivets peuvent se rapporter aux deux cas représentés dans les croquis ci-contre. Dans le premier cas, on superpose d'une certaine quantité les deux feuilles à



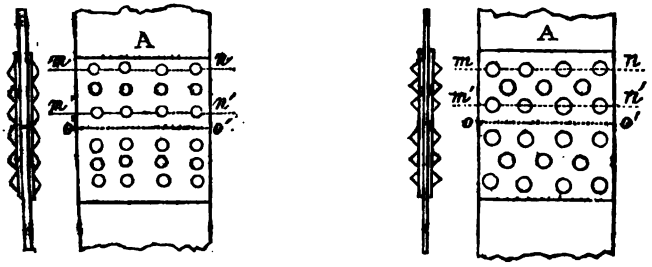
(*) C'est au moyen de cette formule que l'on peut déterminer le diamètre de la goupille qui joint les chaînons d'une chaîne de pont suspendu, comme celles des ponts de Pesth et de Hungerford.

assembler, et on les fixe au moyen d'un rivet; dans le second, les feuilles sont rapprochées bout à bout et fixées au moyen de deux couvre-joints et de deux rivets. Ce dernier système est préférable au premier, parce que, d'abord, il transmet l'effort de traction d'une feuille à l'autre, de manière à assurer l'égalité de tension dans toute la section de chaque feuille; ce qui n'est pas le cas dans le premier assemblage. En second lieu, il provoque nécessairement le double cisaillement des rivets, et permet de leur donner un diamètre plus petit, et par conséquent de moins affaiblir la tôle.

En principe, au lieu d'un seul rivet dans les deux assemblages qui précèdent, il y a avantage à en augmenter le nombre le plus possible; car on voit par la formule (7) que le diamètre des rivets est d'autant plus petit que leur nombre est plus grand. Mais, d'un autre côté, si l'on diminuait par trop le diamètre des rivets, il serait à craindre qu'il ne s'établît dans les fibres du métal, de la ligne centrale des rivets vers les bords, une certaine inégalité de tension dont l'effet serait de diminuer notablement la résistance du système. On ne sait pas jusqu'où l'on peut pousser cette augmentation du nombre des rivets et la réduction de leur diamètre. Il faudrait, pour cela, une longue série d'expériences, dans laquelle on romprait des assemblages dont le nombre de rivets irait toujours en croissant. On verrait ainsi où s'arrête le gain de résistance obtenu par la diminution des trous de rivets. En attendant que l'expérience ait prononcé, il faut se résoudre à se donner l'un ou l'autre des deux termes N ou d, et déterminer l'autre au moyen de la formule.

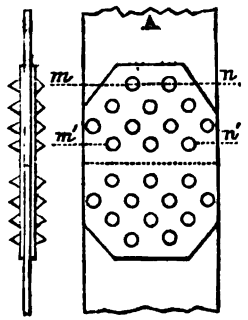
27. Il n'y a rien à changer aux formules et observations qui précèdent pour le cas le plus fréquent, celui où la tôle est assez large pour demander plusieurs rangées longitudinales de rivets. Mais il se présente alors une nouvelle question à résoudre, celle de savoir s'il vaut mieux disposer les rivets en files longitudinales et parallèles, comme l'a proposé et exécuté M. Fairbairn, ou s'il est préférable d'adopter la disposition en quinconce recommandée par M. Ed. Clark. M. Fairbairn donne quelques

bonnes raisons à l'appui de son système. M. Clark prétend que



l'on a reconnu, par expérience, que l'autre valait mieux; mais comme je n'ai trouvé nulle part de trace d'expériences sur ce sujet, j'ai cherché à me former une opinion par la comparaison suivante :

Il faut se rappeler d'abord que les deux assemblages ci-dessus ne peuvent céder que par la rupture de la feuille A en *mn*, ou celle des couvre-joints en *m'n'*, ou enfin par le cisaillement de tous les rivets entre *mn* et *oo'*. Cela posé, si le deuxième assemblage a trois rivets de moins que le premier, et que ces rivets aient le même diamètre, il est évident que sa résistance au cisaillement sera moindre, et que la feuille A et les couvre-joints présenteront sur les rivets un excès de résistance inutile. Si l'on veut égaliser ces résistances, il faudra augmenter le diamètre des rivets, et alors le deuxième assemblage sera encore plus faible que le premier par ses sections *mn* et *m'n'*, aussi bien que par ses rivets. Je ne conçois qu'un cas où la disposition en quinconce l'emporterait sur la première : c'est celui où l'on conserverait le même nombre de rivets et où on les disposerait comme dans la figure ci-contre; car on pourrait alors augmenter le diamètre des rivets et augmenter en conséquence la résistance au cisaillement, sans que pour cela



la résistance de la feuille A, ou des couvre-joints dans les sections extrêmes *mn* et *m'n'*, cessât d'être supérieure à celle du premier assemblage. Il est douteux cependant que l'avantage soit bien grand; et je crois que la première disposition fournit une compensation bien suffisante, par la facilité extrême avec laquelle on peut y adapter les moyens mécaniques pour le percement des trous et la pose des rivets, et par ce fait qu'elle exige des couvre-joints plus courts.

28. Il n'a été question dans tout ce qui précède que de l'assemblage de simples feuilles de tôle. Il peut arriver, soit parce que l'épaisseur de tôle nécessaire à la partie inférieure d'un pont serait trop forte pour être d'une seule pièce, soit pour diminuer les chances de rupture, que l'on forme la partie d'un pont qui résiste à la traction de plusieurs feuilles de tôle superposées. Quelle que soit la disposition d'assemblage que l'on adopte, il ne faut pas perdre de vue qu'elle est soumise aux mêmes conditions que celles dont il vient d'être question, et que, par conséquent, pour tirer le meilleur parti de chaque combinaison il faut dans chaque cas déterminer par le calcul, le diamètre ou le nombre des rivets à adopter.

Je fais cette observation, principalement, parce que les ingénieurs anglais qui ont donné la description des assemblages qui ont été successivement appliqués aux ponts tubulaires se sont figuré qu'il suffisait de substituer un mode d'assemblage à un autre, sans avoir égard au nombre et au diamètre des rivets, pour tirer de la nouvelle disposition tous les avantages qu'elle promettait. C'est là une erreur sur laquelle je n'ai pas besoin de m'appesantir davantage, après ce que j'ai déjà dit sur ce sujet.

CHAPITRE II.

DU FER ET DE LA FONTE SOUMIS A DES EFFORTS DE COMPRESSION.

Raccourcissement du fer et de la fonte.

29. Les observations qui ont été faites au commencement du chapitre précédent sur la manière dont on envisageait les faits relatifs à la traction et celle qui résulte des dernières expériences s'appliquent également à la résistance du fer et de la fonte à la compression. Il suffit d'y mettre à la place des termes *allongement*, *traction*, les deux termes *raccourcissement* et *compression*.

Les formules qui relient les quantités dont le fer et la fonte se compriment aux charges qui les produisent et à la longueur des barres ont aussi la même forme que celles relatives à la traction. Ainsi, pour la fonte, le poids P capable de produire un raccourcissement r dans une barre de longueur L est exprimé par :

$$P = 909\,218\frac{r}{L} - 40\,598\,628\frac{r^2}{L^2}, \qquad (9)$$

d'où l'on tire

$$r = L(0{,}0119 - \sqrt{0{,}000\,125\,387 - 0{,}0000\,000\,246P}). \qquad (10)$$

Pour le fer, la formule est

$$r = \frac{PL}{1621\,231}. \qquad (11)$$

30. En appliquant ces formules, comme précédemment, à deux barres de 1 cent. quarré de section et de 10 mètres de longueur sollicitées par une charge de 1000 k., on trouve, contrairement à l'opinion généralement accréditée, que la fonte se comprime beaucoup plus que le fer sous une même charge. J'ai rapproché ces résultats de ceux obtenus précédemment

sur l'allongement pour permettre de les comparer entre eux d'un seul coup d'œil.

Désignation des métaux.	Allongements		Raccourcissements	
	en centimètres	en fonction de la longueur de la barre.	en centimètre.	en fonction de la longueur de la barre.
Fonte.	1.373	$\frac{1}{730^e}$	1.160	$\frac{1}{860^e}$
Fer.	0.575	$\frac{1}{1740^e}$	0.678	$\frac{1}{1460^e}$

On peut voir par là s'il est avantageux d'associer le fer à la fonte pour résister à un même effort de traction ou de compression.

Résistance du fer et de la fonte à la rupture par compression.

Résistance de la fonte à la compression.

31. Il faut distinguer deux cas : celui où le prisme ou cylindre en fonte se rompt en un grand nombre de morceaux irréguliers, ce qui se rencontre lorsque la plus petite dimension horizontale de l'échantillon est plus grande que la hauteur. La résistance, dans ce cas, peut s'appeler *résistance à l'écrasement*. La connaissance de cette espèce de résistance, très variable d'ailleurs, suivant le nombre et la forme des morceaux du prisme rompu, n'est d'aucune utilité en pratique. Le deuxième

cas est celui où l'échantillon se sépare en deux morceaux réguliers ayant la forme de coins dont l'angle est toujours le même pour divers échantillons d'une même fonte. Ce mode de fracture a lieu toutes les fois que la hauteur de la pièce est comprise entre 1 fois 1/2 et 3 ou 4 fois le diamètre ou la plus petite dimension horizontale. La résistance du métal obtenue dans ces circonstances est celle dont on part pour établir les formules

relatives aux piliers ou colonnes. C'est *la résistance maximum à la compression de la fonte* considérée comme piliers.

Les expériences de M. Hodgkinson sur 17 espèces de fonte assignent à la fonte une résistance moyenne par cent. q. de 6067 k. Ce chiffre est, comme on voit, fort au dessous de celui de 10 000 que l'on trouve dans tous les traités français. De même que dans la résistance à la traction, la différence entre l'échantillon le moins résistant et le plus fort est considérable; ainsi la meilleure fonte n'a cédé que sous une charge de 8467 k. par cent. q., tandis que la plus faible n'a présenté qu'une résistance de 3886 k.

Cependant, de même aussi que pour la traction, la différence entre divers échantillons d'une même espèce de fonte est beaucoup moindre, et permet l'emploi de formules de résistance capables de donner le degré d'approximation déterminé précédemment.

Résistance du fer à la compression.

32. Sous le rapport des phénomènes extérieurs, *le fer* paraîtrait se comporter d'une manière toute différente de la fonte sous des efforts de compression. Au lieu de se briser en morceaux, quelques auteurs rapportent, sans entrer dans aucun détail sur le nombre et l'importance des expériences faites, qu'il s'aplatit en se gonflant vers le milieu de sa hauteur, puis se gerce. De sorte qu'il serait fort difficile de déterminer sa *résistance à l'écrasement,* ce qui du reste importe peu, comme on vient de le voir. La *résistance maximum à la compression* dans le sens qui a été adopté tout à l'heure pour la fonte n'est pas non plus d'une détermination facile, et l'on compte fort peu d'expériences d'où l'on puisse tirer, comme pour la fonte, le chiffre nécessaire à l'établissement des formules de résistance de piliers ou colonnes. Cependant je crois que l'on peut, d'après les expériences de M. Hodgkinson, fixer à 4000 k. par cent. c. la résistance du bon fer en barres laminé; et à 3800 environ celle des tôles de bonne qualité à cassure fibreuse ou cristalline et

présentant des épaisseurs variant depuis 1/2 millimètre jusqu'à 15 millimètres.

Résistance des piliers ou colonnes.

33. Je passerai d'abord rapidement en revue les formules et renseignements que les auteurs français mettent à la disposition des praticiens sur le sujet actuel.

Je ne m'arrêterai pas aux formules d'Euler ou de Navier; elles n'ont jamais été confirmées par l'expérience et n'ont jamais été appliquées. Mais j'appellerai l'attention sur le tableau suivant, auquel tout le monde recourt encore aujourd'hui faute de mieux.

Désignation des métaux.	Densité.	Rapport de la longueur de la pièce à la plus petite dimension transversale				
		au dessous de 12	12	24	48	60
Fonte.	7.21	10000k	8333	5000	1666	833
Fer.	7.79	4900	4084	2450	816	408

Je me bornerai à dire ici que ce tableau est faux de tous points, en me réservant d'en donner la preuve un peu plus loin.

Tredgold a déduit d'une théorie fort contestable sur la résistance des piliers les formules suivantes dans lesquelles, pour les rendre pratiques, il a introduit des coefficients numériques tirés d'expériences *sur la résistance du fer et de la fonte à un effort transversal :*

Résistance d'un pilier en fonte,

$$P = \frac{230\,D^4}{1.24D^2 + 0{,}00039\,L^2}. \qquad (12)$$

Résistance d'un pilier en fer,

$$P = \frac{267\,D^4}{1.24D^2 + 0{,}00034L^2}. \qquad (13)$$

D et L désignant respectivement le diamètre et la longueur du pilier, et P le poids qu'il peut supporter.

34. Il peut être bon de faire remarquer que ces formules sont en désaccord avec le tableau ci-dessus, et qu'on les trouve côte à côte dans les mêmes auteurs, comme s'ils donnaient des résultats concordants. — On peut encore faire à ces auteurs le reproche d'avoir rapporté ces formules sans prendre la précaution d'informer le lecteur :

1° Que, d'après l'intention de Tredgold, elles ne doivent s'appliquer qu'à des piliers dont la longueur serait égale à 30 fois au moins le diamètre;

2° Qu'elles ne donnent que le tiers du poids de rupture, correspondant, suivant l'auteur précité, au point où l'élasticité du métal est encore intacte;

3° Qu'elles supposent le pilier pressé suivant une génératrice, au lieu de l'être dans la direction de son axe.

Or, d'après l'estimation de Tredgold lui-même, un pilier pressé comme il le suppose perd environ la moitié de sa résistance (*); de sorte que P, dans les formules en question ne représente que le sixième à peu près de la résistance du pilier pressé suivant l'axe. Il suit de là qu'un ingénieur habitué à des formules qui donnent la résistance finale à la rupture et ignorant les diverses circonstances que je viens d'énumérer multiplierait par le coefficient de sécurité 3 ou 4 le poids P, et se trouverait ainsi, à son insu, avoir déterminé le diamètre d'une colonne capable de supporter 18 ou 24 fois la charge permanente qui lui serait destinée. Cela peut être fort rassurant; mais, à coup sûr, ce n'est pas économique.

Si les formules de Tredgold sont d'accord avec l'expérience dans les conditions qu'il a lui-même assignées, c'est un hasard; car la méthode au moyen de laquelle il les a obtenues était inexacte. Elles ne m'ont paru, du reste, susceptibles d'être con-

(*) D'après les expériences de M. Hodgkinson, cette perte est des deux tiers.

firmées par l'expérience, que dans l'hypothèse où il existerait une fonte offrant une résistance maximum à la compression de 10 000 kilogrammes; ce qui est fort au dessus de la résistance maximum trouvée par M. Hodgkinson. Dans tous les cas, ces formules doivent être rejetées, parce qu'elles ne sont pas disposées pour s'adapter aux résistances variables présentées par les fers ou les fontes de provenances diverses.

35. Les formules de M. Hodgkinson que je vais rapporter ne satisfont pas davantage à cette dernière condition; mais elles ont sur les autres le grand avantage d'avoir été établies d'après des expériences nombreuses sur les piliers. Ces formules, transformées de manière à ce que les dimensions des piliers soient en centimètres et les poids en kilogrammes, sont les suivantes :

Résistance à la rupture d'un pilier plein en fonte à section quarrée ou circulaire de côté ou diamètre D *à bases planes et perpendiculaires à l'axe.*

$$P = 521.67 \frac{D^{3.60}}{L^{1.70}}. \qquad (14)$$

Résistance à la rupture d'un pilier creux en fonte à bases planes; D *et d étant respectivement le diamètre intérieur et extérieur.*

$$P = 523.33 \frac{D^{3.60} - d^{3.60}}{L^{1.70}}. \qquad (15)$$

Ces formules, comme celles de Tredgold, ne s'appliquent qu'à des piliers dont la longueur n'est pas moins de trente fois le diamètre. Pour des piliers plus courts, M. Hodgkinson donne la formule :

$$R = \frac{BC}{B + \frac{3C}{4}}, \qquad (16)$$

dans laquelle B est la résistance du pilier court calculé par la formule précédente comme s'il était long, et C la résistance maximum à la compression d'un cylindre en fonte d'une section égale à celui du pilier proposé, mais dont la hauteur serait égale à une fois et demie le diamètre seulement.

Ces formules concordent d'une manière satisfaisante avec les nombreux résultats d'expérience de M. Hodgkinson; mais les coefficients numériques dont elles sont affectées n'appartiennent qu'à une fonte offrant une résistance maximum de 8133 kil. par cent. quarré, qui est celle des expériences de M. Hodgkinson. En outre, on ne peut se dissimuler que les exposants fractionnaires les rendent d'un usage incommode dans la pratique. En suivant une méthode différente, j'en ai trouvé d'autres qui, non seulement sont affranchies des inconvénients que je viens de signaler, mais qui, en outre, ont l'avantage d'être générales, c'est-à-dire de s'appliquer (avec autant d'exactitude que celle de l'expérimentateur) à des piliers de toutes dimensions.

Nouvelles formules de la résistance de piliers pleins en fonte et en fer à bases planes et perpendiculaires à l'axe.

36. *Résistance de piliers en fonte pour des hauteurs comprises entre* 4 *fois et* 120 *fois leur diamètre.*

$$R = \frac{C}{1.45 + 0.00337 \left(\frac{L}{D}\right)^2}. \qquad (17)$$

Résistance de piliers en fer pour des hauteurs comprises entre 10 *fois et* 180 *fois leur diamètre.*

$$R = \frac{C}{1.55 + 0.0005 \left(\frac{L}{D}\right)^2}. \qquad (18)$$

Outre ces formules générales, j'en ai trouvé d'autres un peu plus simples s'appliquant aux cas désignés par MM. Tredgold et Hodgkinson sous le nom de *piliers courts*, qui sont ceux dont la hauteur est comprise entre 5 fois et 30 fois le diamètre. Ces formules sont :

Pour la fonte,

$$R = \frac{C}{0.68 + 0.1 \frac{L}{D}}. \qquad (19)$$

Pour le fer,

$$R = \frac{C}{0.85 + 0.04 \frac{L}{b}}. \qquad (20)$$

Dans ces formules, C représente le produit de la section du pilier par la résistance maximum à la compression par cent. quarré du fer ou de la fonte dont on dispose.

37. Si l'on applique ces formules, qui ont la sanction de l'expérience (comme on le verra plus loin), à deux séries de piliers de 1 cent. quarré de section ; la première en fonte présentant une résistance maximum à la compression de 8000 k. par cent. quarré; la seconde en fer offrant une résistance de 4000, les hauteurs des piliers étant comprises entre 10 et 100 fois le diamètre, on trouve :

Désignat. des métaux.	Rapport de la longueur de la pièce à la plus petite dimension transversale.										
	Au dessous de 5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Fonte.	8000	4476	2839	1784	1168	1013	688	445	351	277	230
Fer.	4000	2500	2385	2000	1702	1498	1194	1000	848	714	610

D'après le tableau du § 33, qui sert actuellement de guide aux praticiens, il résulterait que, tant que la longueur du pilier n'atteint pas 12 fois son diamètre, ce pilier conserve sa résistance maximum ; et l'on voit, au contraire, d'après le dernier, que cette résistance n'est plus que la moitié environ de la résistance maximum lorsque la longueur du pilier n'est encore égale qu'à dix fois le diamètre seulement. En outre, il suivrait encore du premier tableau que la fonte conserve pour toutes les longueurs la supériorité qu'elle a sur le fer dès le commencement. Il est hors de doute, au contraire, que, lorsque la hauteur du pilier atteint trente fois le diamètre, le fer

l'emporte sur la fonte. Ce fait est de la plus grande importance, et justifie, dans un grand nombre de cas, la préférence donnée au fer par les ingénieurs anglais dans leurs constructions récentes.

38. Afin de montrer le degré d'approximation que les formules précédentes peuvent donner, je les ai appliquées dans le tableau suivant aux expériences de M. Hodgkinson, et j'ai mis les résultats obtenus en regard de ceux fournis par l'expérimentation. En outre, pour ne laisser, à leur sujet, aucun nuage dans l'esprit de personne, j'entrerai dans quelques détails sur la méthode que j'ai suivie pour les obtenir. Je suis d'autant mieux porté à décrire cette méthode que je la crois propre à rendre quelques services dans d'autres questions de mécanique expérimentale.

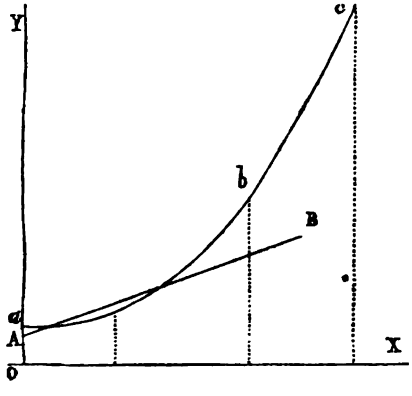
Voici le tableau des expériences de M. Hodgkinson, que j'ai tiré de son ouvrage sur la fonte, p. 354. J'ai dû en changer la disposition pour satisfaire au but que je m'étais proposé. Mais j'ai pris le soin d'indiquer les numéros d'ordre de l'expérimentateur, afin que l'on pût au besoin recourir à son tableau et le comparer au mien.

Piliers pleins en fonte à bases planes et perpendiculaires à l'axe.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N° d'ordre du tableau de M. H.	N° d'ordre du tableau actuel.	Longueur des piliers. L	Diamètre des piliers. D	Sections des piliers. S	Rapports de la longueur au diamètre. $\frac{L}{D}$	Moyennes des rapports $\frac{L}{D}$ x	Produit de la section du pilier par la résistance maximum de la fonte à la compression. C	Résistance des piliers à la rupture trouvée par expér. R	Rapport des deux dernières résistances. $\frac{C}{R}$	Moyenne des rapports $\frac{C}{R}$. y	Résistance des piliers calculée par la formule $R=\frac{C}{1,45+0,00337\left(\frac{L}{D}\right)^2}$	Résistance des piliers calculée par la formule $R=\frac{C}{0,68+0,1\frac{L}{D}}$	Résistance des piliers calculée par la formule de M. H. $R=\frac{BC}{B+\frac{3C}{4}}$
		cent.	cent.	c. q.				kil.			kil.	kil.	kil.
23	1	2.540	1.320	1.36	1.92	1.92 (*a*)	11061	11061	1.00	»	»	»	»
22	2	5.080	1.320	1.36	3.85	3.85 (*b*)	11061	10368	1.06	1.06	10943	10380	»
21	3	9.604	1.270	1.26	7.55	7.55 (*c*)	10247	7920	1.29	1.29	9183	7148	7704
20	4	18.192	1.973	3.05	9.22	9.22 (*d*)	24805	14842	1.67	1.67	14337	15180	16381
18	5	25.611	1.950	2.98	13.13	13.72 (*e*)	24236	11753	2.06	2.03	11936	12157	13313
19	6	18.192	1.270	1.26	14.32		10247	5103	2.00		4784	4851	5261
14	7	38.417	2.540	5.06	15.14	15.27 (*f*)	41153	18349	2.25	2.25	18513	18757	19857
16	8	30.734	1.994	3.11	15.40		25293	11212	2.26		11240	11393	12261
13	9	38.417	1.968	3.03	19.57	19.83 (*g*)	24643	9752	2.52	2.66	9000	9345	9630
11	10	51.223	2.595	5.28	19.73		42942	14420	2.97		15557	16186	16153
17	11	25.611	1.270	1.26	20.16		10247	4049	2.53		3636	3801	4022
15	12	30.734	1.270	1.26	24.19	25.07 (*h*)	10247	3262	3.14	3.32	3000	3306	3322
10	13	51.223	1.973	3.05	25.98		24805	7064	3.51		6668	7574	7093
12	14	38.417	1.295	1.30	29.66	29.81 (*j*)	10373	3066	3.44	4.00	2397	2900	»
8	15	76.855	2.563	5.16	29.96		41966	9206	4.55		9387	11416	»
5	16	153.770	3.962	12.32	38.81	39.46 (*k*)	100198	13151	7.63	6.60	15355	»	»
7	17	76.855	1.958	3.00	39.33		24399	3995	6.10		3663	»	»
9	18	51.223	1.293	1.30	40.32		10573	1736	6.09		1534	»	»
4	19	153.770	3.276	8.42	46.93	46.93 (*l*)	68480	7282	9.40	9.40	7720	»	»
6	20	76.855	1.270	1.26	60.52	60.62 (*m*)	10247	753	13.60	14.03	743	»	»
3	21	153.770	2.532	5.03	60.73		40909	2828	14.46		2959	»	»
2	22	153.770	1.955	3.00	78.14	78.14 (*n*)	24399	1114	21.92	21.92	1107	»	»
	23	153.770	1.293	1.30	118.74	118.74 (*o*)	10573	222	47.62	47.62	216	»	»

Observation. — Les lettres *a*, *b*, *c*, *d*, etc., qui accompagnent les nombres inscrits dans la 7e colonne, indiquent dans la planche les points où se terminent ces nombres portés en abscisses sur l'axe des *x*.

39. En examinant le tableau qui précède, on remarque que les rapports $\frac{L}{D}$ ont été rangés dans l'ordre de leur grandeur ; et l'on trouve que, par suite de cette disposition, les rapports $\frac{C}{R}$ sont disposés dans le même ordre, à quelques anomalies près. Mais ces anomalies disparaissent si, au lieu de s'arrêter aux premiers rapports obtenus, on groupe en une seule moyenne tous ceux qui s'écartent peu l'un de l'autre. On forme ainsi les colonnes 7 et 11 du tableau. Arrivé à ce point, il ne reste plus pour reconnaître si ces deux espèces de rapports sont liés par une loi régulière, qu'à prendre deux axes rectangulaires et à y



porter comme abcisses et ordonnées d'un même point les rapports correspondants. C'est ce que j'ai fait, et j'ai obtenu ainsi une courbe *abc* d'une grande régularité et qui m'a paru appartenir à la forme parabolique dont l'équation générale est $y = ax^m + b$.

Dans cette équation, deux choses étaient à déterminer : la valeur du coefficient a et celle de l'exposant m de x. On ne pouvait évidemment y arriver que par tâtonnements, en prêtant à m diverses valeurs entières ou fractionnaires, plus grandes ou plus petites que l'unité; car l'exposant 1 ferait de l'équation ci-dessus celle d'une droite rencontrant l'axe des Y à une hauteur b. J'ai d'abord supposé $m = 2$, et, après avoir fait l'épure de la courbe et prolongé cette courbe jusqu'à sa rencontre avec l'axe des Y, j'ai trouvé pour b une valeur de 1.45. J'ai alors écrit les équations correspondant aux ordonnées suivantes, à peu près équidistantes :

$$y' = 2.25, \quad y'' = 14.03, \quad y''' = 47.62,$$

et j'en ai tiré les valeurs suivantes de a :

$$a' = 0{,}00\,343, \quad a'' = 0{,}00\,342, \quad a''' = 0{,}00\,327.$$

On ne peut s'attendre en pratique à trouver des valeurs plus concordantes de a. J'ai donc pris la moyenne de ces trois valeurs et je me suis arrêté à l'équation :

$$y = 0{,}00\,337x^2 + 1.45,$$

comme représentant aussi exactement que possible la loi qui lie les rapports $\frac{L}{D}$ et $\frac{C}{R}$; et en y introduisant ces rapports à la place de y et de x, j'en ai tiré finalement :

$$R = \frac{C}{1.45 + 0{,}00\,337\left(\frac{L}{D}\right)^2}.$$

Si l'on applique à cette formule les données numériques de tous les piliers expérimentés par M. Hodgkinson, on trouve les valeurs inscrites dans la 12e colonne du tableau précédent, et qui s'approchent dans les limites voulues de celles données par l'expérience.

J'ai mis en regard les résultats obtenus par la formule de M. Hodgkinson, et l'on peut s'assurer que cette formule ne donne pas une plus grande approximation que la mienne.

Dans une certaine limite, on peut trouver une ligne droite AB qui répond aussi bien que la courbe aux coordonnées $\frac{L}{D}$ et $\frac{C}{R}$; alors l'équation générale ci-dessus devient :

$$y = ax + b,$$

et b étant trouvé par l'épure égal à 0,68, on arive à la formule :

$$R = \frac{C}{0{,}68 + 0{,}1\,\frac{L}{D}},$$

qui est d'un usage plus commode pour les piliers courts que la formule générale.

Les formules applicables au fer ont été obtenues par le même procédé.

Afin de ne pas trop sortir du cadre habituel d'un mémoire, je me dispenserai à l'avenir de m'étendre aussi longuement que je viens de le faire sur les procédés au moyen desquels j'ai obtenu les autres formules qui suivent. Je me bornerai à transcrire ces formules et à mettre autant que possible les résultats qu'elles donnent en présence de ceux fournis par l'expérimentation, afin de montrer au praticien le degré de confiance qu'il peut leur accorder.

Piliers creux cylindriques.

40. La faible différence qui existe entre les coefficients numériques des formules de M. Hodgkinson (14 et 15) sur les piliers pleins et les piliers creux permet d'affirmer que :

La résistance d'un pilier creux cylindrique est égale à la différence des résistances de deux piliers pleins ayant pour diamètres, le premier le diamètre extérieur, le second le diamètre intérieur du pilier creux proposé.

Cette loi est confirmée par son application aux expériences de M. Hodgkinson sur les piliers creux en fonte et en fer. Dans un petit nombre d'expériences sur le fer, j'ai trouvé quelques anomalies; mais on peut dire que les deux tiers des cas satisfont à la loi; et les anomalies s'expliquent soit par les circonstances mêmes de l'expérimentation, soit par le mode de construction des tubes expérimentés.

Piliers creux quarrés ou rectangulaires.

41. M. Hodgkinson s'est livré aussi à un assez grand nombre d'expériences sur des piliers de cette espèce (on en trouve le détail dans l'ouvrage de M. Ed. Clark ou dans le rapport de la commission d'enquête, p. 149). Malheureusement il n'en a tiré aucun parti; car, d'abord, il a cru que cette sorte de piliers n'était assujettie à aucune loi; et dans une autre occasion, je pourrai faire voir que les conséquences qu'il en a déduites sont ou inexactes, ou sans utilité pour les praticiens. Je me

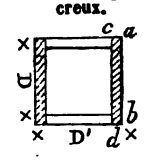
suis efforcé de combler la lacune regrettable laissée par M. Hodgkinson, et j'ai trouvé la formule suivante, qui rend compte avec le degré d'approximation ordinaire des cas d'expérience :

$$R = \frac{A + B'}{2} + B. \qquad (21)$$

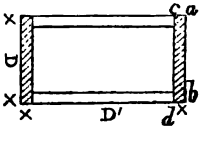
dans laquelle R désigne la résistance totale du pilier proposé;

A celle des parois hachées calculée par la formule

Section d'un pilier creux.



$$A = \frac{C}{1.55 + 0{,}0005\left(\frac{L}{D}\right)^2},$$



comme si elles appartenaient à un pilier plein ayant les dimensions extérieures du pilier proposé;

B' la résistance de ces mêmes parois calculée par la formule

$$B = \frac{C}{1.55 + 0{,}0005\left(\frac{D'}{e}\right)^2},$$

comme si elles appartenaient à deux piliers rectangulaires pleins de section *abcd*, d'épaisseur *e*, et de hauteur égale à la dimension extérieure et transversale D' du pilier creux;

Enfin, B la résistance des parois non hachées calculée par la formule

$$B = \frac{C'}{1.55 + 0{,}0005\left(\frac{D}{e'}\right)^2},$$

comme si elles formaient deux piliers rectangulaires d'épaisseur *e'*, de largeur D—2*e*, et de hauteur égale à l'autre dimension transversale D du pilier creux proposé.

Lorsque le tube est quarré et l'épaisseur de la tôle uniforme, $\frac{D'}{e}$ et $\frac{D}{e'}$ sont la même chose que $\frac{D}{e}$, mais C' est toujours plus petit que C.

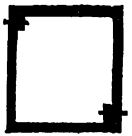
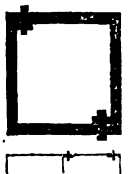
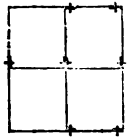
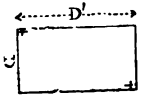
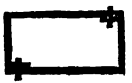
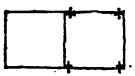
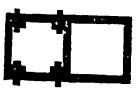
N. B. Bien que cette règle paraisse compliquée au premier abord, elle est néanmoins d'un emploi très facile, puisqu'elle consiste purement et simplement dans trois applications successives de la formule générale des piliers pleins.

42. La loi de la résistance des piliers creux quarrés étant de la plus haute importance, comme on le verra plus loin, pour le calcul des ponts tubulaires de toutes les formes, j'ai cru devoir donner ci-après le tableau des expériences de M. Hodgkinson, et appliquer la formule à tous les cas, afin de montrer le degré d'approximation que l'on peut en tirer.

Piliers en fer creux, ou tubes à sections quarrées ou rectangulaires.

Expériences de M. Hodgkinson (p. 149 du Rapport de la Commission d'enquête).

1 — N° de ce tableau.	2 — N° d'ordre des expériences de M. Hodgkinson.	3 — Dimension des tubes. Longueur. L	4 — Côté de la section quarrée ou petit côté de la section rectang. D	5 — Grand côté de la section rectangulaire. D′	6 — Epaisseur de la tôle. e	7 — Rapport $\frac{L}{D}$	8 — Rapport $\frac{D}{e}$	9 — Forme de section des tubes ou piliers.	10 — Section.	11 — Résistance totale trouvée par expérience	12 — Résistance par centimètre quarré de section.	13 — Résistance calculée par la formule R — R′ des piliers creux cylindriques	14 — Résistance calculée d'après la formule n° 21.	15 — OBSERVATIONS.
		cent.	cent.		cent.				c. q.	kil.	kil.	kil.	kil.	
1	1	304.80	10 414	»	0.076	29	137		3 2516	2509	771	7613	2425	La résistance maximum de la tôle à la compression, déduite d'expériences précédentes, est de 3800 kilog. par centimètre quarré : c'est le chiffre adopté dans le tableau actuel.
2	»	152.40	d°	»	d°	15	d°		d°	2631	809	»	2708	
3	»	76.20	d°	»	d°	7	d°		d°	2834	871	»	3580	
4	2	304.80	10.414	»	0.152	29	68		6.5806	8907	1354	14144	8224	
5	3	304.80	10.795	»	0 211	28	51		9 5470	16936	1769	20603	14218	Il importe d'observer que la formule générale $R = \frac{C}{1{,}55 + 0{,}0005\left(\frac{L}{D}\right)^2}$ ne donne de bons résultats que tant que le rapport $\frac{L}{D}$ ne descend pas au dessous de 10 ; à partir de ce terme $\frac{L}{D} = 10$, il convient de prendre la formule $R = \frac{C}{0{,}85 + 0\,01\frac{L}{D}}$, qui donne des résultats fort approchés jusqu'à la limite $\frac{L}{D} = 4$.
6	»	152 40	d°	»	0.216	7	d°		d°	15254	»	»	15042	
7	»	76.20	d°	»	0.216	5	d°		d°	18725	1968	»	17572	
8	4	304.80	10 795	»	0 340	28	32		15 4496	23434	1518	33936	27039	
9	»	228.60	d°	»	d°	21	d°		d°	25180	»	»	28440	
0	»	51.03	11.277	»	0 345	5	33		d°	33113	2148	»	35590	
1*	10	304 80	20.574	»	0 152	15	135		13 3548	12489	933	30633	11210	
2	»	233.68	d°	»	d°	11	d°		d°	12489	»	»	11410	
3	11	304.80	21.260	»	0.353	14	60		31.7817	45519	1432	72049	45336	* Ce tube est presque semblable au tube n° 2, et présente à peu près la même résistance par centimètre quarré.

14	12	304.80	21.72	21.590	0.556	14	38		49.9140	90206	1796	121932	91933	
15**	13	304 80	21 336	21 590	0 604 et 0.622	14	34		54.6240	102393	1734	»	104537	** M. Hodgkinson fait observer en cet endroit qu'il n'est pas bien certain que le tube ait commencé à céder sous la charge de 102393 kilog. L'expérience n'a pas été poussée plus loin.
16***	14	304.80	20 574	»	0.162	15	$63 = \frac{1}{2}\frac{D}{e}$		22.9676	31770	1385	»	31645	*** Au lieu du rapport $\frac{D}{e}$, il faut ici prendre $\frac{1}{2}\frac{D}{e}$
17	»	152.40	d°	»	d°	7	d°		d°	37366	»	»	37800	
18	»	71 14	d°	»	d°	4	d°		d°	38888	»	»	40300	
19	5	304.80	10 414	20 764	0 155	29	67		9.8938	10559	1067	»	10378	Outre le rapport $\frac{D}{e}$, il faut, pour le calcul des tubes rectangulaires, un autre élément, qui est le rapport $\frac{D'}{e}$.
20	»	233.68	d°	d°	d°	22	d°		d°	11264	»	»	10687	
21	»	71.14	d°	d°	d°	6	d°		d°	9667	»	»	12892	
22	6	304 80	12 065	21.590	0.670	25	18		47.3260	89394	1891	»	100081	
23	7	304.80	10.795	21.336	0 660	28	17		43.4515	92659	2106	»	92400	
24	8	304.80	10 414	20.574	0.150	29	69		12.2915	19801	1355	»	14300	
25	»	232.41	d°	d°	d°	22	d°		d°	20608	»	»	14780	
26	»	111.76	d°	d°	d°	10	d°		d°	18707	»	»	15343	
27	»	49 53	d°	d°	d°	5	d°		d°	22232	»	»	18684	
28****	9	304.80	12.063	21.590	0.635	25	20		53.8450	94262	1750	»	109320	**** Sous la charge de 94262 kilog., le tube n'avait pas encore donné de signes de rupture.

On remarquera dans ce tableau que la résistance des tubes, calculée d'après la loi des piliers cylindriques creux, s'écarte beaucoup des résultats de l'expérience pour les tubes dans lesquels l'épaisseur de la tôle est faible relativement à la dimension transversale extérieure ; mais que, cependant, les résultats obtenus d'après les deux lois se rapprochent beaucoup à mesure que le rapport $\frac{D}{e}$ diminue. Ainsi, par exemple, pour le n° 14, correspondant à un rapport $\frac{D}{e}=38$, les deux résultats inscrits dans les colonnes 13 et 14 ne diffèrent plus que d'un cinquième du plus faible des deux ; et l'on prévoit qu'il doit exister un point où la loi des piliers quarrés cesse d'être exacte et doit être remplacée par celle des piliers creux cylindriques. Aussi, à partir d'un rapport $\frac{D}{e}=30$, conviendrait-il, peut-être, de calculer la résistance des deux manières et de prendre le résultat le plus faible.

45. La grande analogie qui existe entre les autres formules de résistance du fer et de la fonte permet de supposer que la loi des piliers creux rectangulaires ou carrés que l'on vient de tracer serait également applicable à la fonte. Seulement il est probable que la circonstance particulière qui a nécessité pour le fer l'introduction dans la formule du terme B′ n'existe pas pour la fonte, et que, pour ce métal, la formule se réduirait à

$$R=A+B. \qquad (22)$$

A et B auraient des valeurs analogues à celles décrites précédemment ; mais il faudrait déterminer par expérience la hauteur du pilier rectangulaire dont B représente la résistance.

44. Afin que ce mémoire présente un résumé aussi complet que possible sur les lois de la résistance des piliers en fer ou en fonte, j'ajouterai, pour terminer cet article, l'énonciation suivante des autres faits que M. Hodgkinson a tirés de ses expériences sur les piliers.

1° Dans des piliers longs de même dimension, la résistance à la rupture est environ trois fois plus grande lorsque les extré-

mités sont planes et solidement assises que lorsqu'elles sont rondes et capables de tourner.

2° La résistance d'un pilier dont une extrémité est plane et l'autre arrondie est une moyenne arithmétique entre celles d'un pilier à extrémités arrondies et celle d'un pilier à extrémités planes. Ainsi, dans trois piliers de même hauteur, le premier ayant ses extrémités rondes, le deuxième une extrémité ronde et l'autre plate, le troisième ayant ses deux extrémités plates, les résistances sont entre elles comme 1, 2 et 3, approximativement.

4° Un pilier dont une extrémité est parfaitement fixée et l'autre susceptible de prendre un mouvement, comme dans le cas où elle est arrondie, se rompt à un tiers de la longueur à partir de l'extrémité ronde : ce serait donc une bonne disposition que de renforcer un tel pilier dans la partie où la rupture tend à s'effectuer.

5° Un pilier fixé irrégulièrement, de telle sorte que la pression se transmette diagonalement, comme dans la figure ci-contre, perd les deux tiers de sa résistance.

15. Outre ces faits relatifs à l'influence du mode de fixation des piliers sur la résistance, on trouve encore dans l'ouvrage de M. Hodgkinson ceux qui suivent sur l'influence de la forme :

1° Les piliers pleins à section circulaire, à extrémités planes ou arrondies, ne gagnent que un huitième à un septième en résistance lorsqu'on augmente graduellement leur diamètre des extrémités au milieu de la longueur.

2° Les piliers creux à section circulaire renflés vers leur milieu ou vers une extrémité ne résistent pas plus que ceux de même poids et uniformément cylindriques. M. Hodgkinson penche même à croire qu'ils sont plus faibles. Mais je dois dire que les expériences de cet auteur ne sont pas décisives à cet égard, et qu'il tire plutôt cette manière de voir de l'examen de la formule théorique d'Euler sur des piliers creux en forme de cône tronqué que du fait expérimental.

3° Un pilier plein à section circulaire ayant une extrémité arrondie gagne en résistance en le renforçant au tiers de sa longueur à partir de l'extrémité arrondie.

4° La résistance d'un pilier ayant en section la forme ci-contre d'une bielle de machine à vapeur n'est pas la moitié de celle que présenterait la même quantité de métal sous la forme d'un pilier creux uniformément cylindrique ; le rapport trouvé dans les expériences de M. Hodgkinson pour les deux cas étant de 17,578 à 39,645.

Il n'existe pas d'expériences sur d'autres formes qui ont été et sont encore quelquefois employées, telles que les suivantes :

mais il est permis de penser, d'après l'exemple qui précède et ce qui a été dit sur les piliers carrés et rectangulaires en fer, que ces diverses formes sont de beaucoup inférieures à la forme cylindrique.

Flexion des piliers.

46. M. Hodgkinson a trouvé que les piliers commencent déjà à fléchir visiblement sous des charges beaucoup plus petites que celles qu'ils sont appelés à supporter en pratique. Il regarde même comme probable que la flexion se produit sous les plus petites charges ; ce qui est entièrement différent des idées reçues avant lui. L'erreur dans laquelle sont tombés ceux qui l'ont précédé a pu venir de ce qu'ils ont opéré sur des piliers courts dans lesquels la flèche produite sous les plus fortes charges est peu sensible. Du reste, même dans les piliers les plus longs, cette flèche est peu considérable, car on trouve dans les expériences de M. Hodgkinson que celle produite par une charge égale à la moitié de la charge de rupture dans un pilier à bouts arrondis, et dont la longueur était 120 fois le diamètre n'a été que le dixième du diamètre. Cette flèche eût été beaucoup plus faible encore si les extrémités avaient été planes.

47. En examinant attentivement les expériences de M. Hodgkinson, j'ai trouvé le fait suivant, qui a échappé à cet expérimentateur, et qui cependant est d'une grande importance : c'est que *la flèche du pilier qui correspond à la charge de rupture n'atteint jamais la moitié du diamètre du pilier.*

Il résulte de là qu'au moment où le pilier atteint son maximum de résistance, aucune partie de sa section n'est encore soumise à un effort de traction, puisque la résultante des pressions, indiquée dans la figure ci-contre par la ligne ponctuée, ne sort pas encore du solide; par conséquent, toutes les théories sur la résistance des piliers basées sur cette hypothèse qu'une partie de la section est, à ce moment, tirée et l'autre comprimée, sont fausses. Il est incontestable que ce phénomène finit par se produire. Mais à partir de l'instant où il commence à se manifester, la résistance du pilier va nécessairement en décroissant, jusqu'à la rupture. Il s'ensuit que l'on ne peut tirer le moindre enseignement de l'aspect présenté par la section de fracture sur le mode de résister du solide, parce que la situation de cette section au moment qui précède immédiatement celui où le solide est séparé en deux pièces est tout-à-fait différente de celle qui doit exister au moment où le maximum de résistance est atteint. J'insiste d'autant plus sur ce point, que M. Hodgkinson a l'habitude de conclure de l'aspect de la fracture d'un solide la nature des actions développées à l'intérieur sous l'influence de la charge qui produit la rupture. Ainsi, en ce qui concerne les piliers, il en tire la confirmation de l'hypothèse dont l'observation ci-dessus, tirée des expériences de M. Hodgkinson lui-même, démontre la fausseté. Dans un solide soumis à un effort transversal, il détermine de la même manière, et sans plus de raison, la position de l'axe neutre.

48. L'ancienne hypothèse, qui sert de base à une théorie inadmissible, a en outre le tort, non seulement de ne pas expliquer le phénomène de la flexion, mais encore de rendre toute explication impossible. On ne comprend pas, en effet, qu'un pilier de nature homogène que l'on suppose formé de

tranches parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe, et pressé bien également entre deux surfaces planes et perpendiculaires à cet axe, puisse jamais fléchir. Il n'y a aucune raison pour que la flexion se produise plutôt d'un côté que de l'autre. Cette flexion se conçoit très bien au contraire, si l'on admet, ce qui est à la fois plus naturel et plus conforme à l'expérience, qu'un pilier se compose de tranches parallèles inclinées sur l'axe suivant l'angle des coins de fracture que l'on obtient dans des cylindres en fonte dont la hauteur ne dépasse pas quatre fois le diamètre (§ 31). Dès lors, toutes les particularités de la flexion des solides s'expliquent en considérant ces tranches comme glissant les unes sur les autres, et, en outre, comme conséquence de ce glissement, se rapprochant davantage les unes des autres du côté opposé où le glissement s'effectue. Je n'insisterai pas sur cette nouvelle manière d'envisager la flexion des piliers, parce qu'elle n'a guère d'intérêt que pour le physicien, et que les formules de rupture que j'ai trouvées en sont tout à fait indépendantes.

49. *Action prolongée de la charge.* — Il peut être bon de mentionner ici, en confirmation de faits semblables qui ont été rapportés, qu'il résulte d'expériences faites par M. Hodgkinson et continuées pendant un espace de temps considérable qu'un pilier soustrait aux chocs et aux vibrations peut supporter indéfiniment les charges les plus voisines de celle de rupture.

CHAPITRE III.

DU FER ET DE LA FONTE SOUMIS A UN EFFORT TRANSVERSAL.

Solides à section pleine.

50. Le cas le plus simple d'un solide soumis à un effort transversal est celui d'une barre de section quarrée ou rectangulaire. La théorie donne pour la formule de la résistance d'un pareil solide, lorsqu'il repose sur deux appuis par ses extrémités :

$$\frac{1}{4}PL = \frac{1}{6}TEH^2,$$

P, E, H, L, T, désignant respectivement le poids de rupture du solide, sa dimension transversale horizontale, sa dimension verticale, sa longueur et sa résistance à la traction par cent. quarré. Si, pour obtenir la confirmation de cette formule, on l'applique à *une barre de fonte* qui a été rompue sous une charge de 273^k, et formée d'un métal présentant une résistance à la traction de 1,175^k et ayant les dimensions suivantes :

$$L=401^{mm}.74, \quad H=5^c.08, \quad E=2^c.54,$$

on trouve P=127, c'est-à-dire la moitié environ de la charge trouvée par expérience.

Si l'on prend *une barre d'un fer* présentant une résistance à la traction par cent. q. de 3,300^k, ayant rompu sous une charge de 2,330^k, avec les dimensions suivantes,

$$L=30^c.48, \quad H=2^c.54, \quad E=2^c.54,$$

et que l'on y applique la formule ci-dessus, on ne trouve encore pour la valeur de P que 1,078^k, la moitié environ de la charge de rupture réelle.

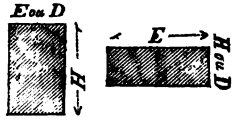
En faisant d'autres applications à des cas d'expériences, on retrouve des résultats semblables. Il faut donc en conclure que, pour mettre la théorie d'accord avec la pratique, il devient nécessaire de substituer dans la formule ci-dessus le coefficient $\frac{1}{3}$ au coefficient $\frac{1}{6}$, et l'on a :

$$\frac{1}{4}PL=\frac{1}{3}TEH^2. \qquad (23)$$

Ceci explique la dissidence que j'ai signalée, au § 12, entre la résistance à la traction de la fonte déduite de l'expérience directe et cette même résistance déduite de l'application de la formule théorique. On ne comprend pas que les auteurs français aient laissé subsister une discordance aussi étrange lorsqu'il était si facile de l'éviter (1).

(*) On trouve dans l'ouvrage de M. Hodgkinson, p. 452, un tableau d'expériences par effort transversal sur des barreaux de fontes diverses, des-

51. La formule précédente modifiée ne s'applique qu'à des barres de fonte dont la plus petite dimension transversale n'excède pas 2 c. 1/2 environ ; au delà elle donnerait des résultats trop forts. Cela tient à ce que plus le calibre de la barre est fort et plus le taux de la résistance à la traction diminue. Pour mettre la formule en état de tenir compte de cette circonstance, j'ai trouvé, par tâtonnements, qu'il suffisait de multiplier le second nombre par le facteur (1.18—0.07D), D indiquant la plus petite dimension transversale du solide ; la formule devient donc pour la fonte ;



$$\frac{1}{4}PL=\frac{1}{3}TEH^2(1.18-0.07D). \quad (24)$$

Pour que cette formule fût bien applicable aux fontes du pays, il faudrait commencer par rompre des barreaux ayant environ 2 cent. 1/2 de côté, et, après avoir introduit les résultats obtenus dans la formule, en déduire la valeur de T pour chaque espèce de fonte.

Je donne ci-après le tableau des expériences du capitaine Henry James sur un grand nombre de barreaux en fonte de la qualité désignée sous le nom de « clyde iron n° 3. » Dans des expériences préalables, M. Hodgkinson avait trouvé que la résistance de cette espèce de fonte à la traction était de 1,650^k par cent. quarré. C'est le chiffre qui a été mis à la place de T dans la formule.

---

quelles il a déduit la valeur du coefficient n dans la formule $\frac{1}{4}PL=\frac{1}{n}TEH^2$, en y introduisant la valeur de T obtenue directement par l'expérience. Il en a conclu pour n une valeur moyenne égale à 2.63. En examinant ce tableau attentivement, j'ai trouvé que l'on pouvait séparer les résultats en deux catégories : la première se composant de fontes inférieures et dont la résistance à la traction variait de 944 à 1021^k par cent. quarré, pour lesquelles n était égale à 2.27 ; la seconde se composant de fontes supérieures à la moyenne générale, variant de 1172 à 1539^k par cent. quarré et pour lesquelles n était égale à 3 très approximativement.

52. *Tableau des expériences du capitaine Henry James.*

N° d'ordre.	Longueur. L	Hauteur. H	Epaisseur. E	Poids de rupture trouvé par expérience.	Poids de rupture calculé par la formule $\frac{1}{4}PL=\frac{1}{3}TEH^2$.	Résultats des calculs précédents multipliés par le facteur (1.18—0,07D).	Nombre de barres de même espèce expérimentées	OBSERVATIONS.
	c.	c.	c.	k.	k.	k.		
1	137.24	2.54	2.54	257	262	262	3	Dans ces expériences, les dimensions des barres ont été prises avec le plus grand soin, à un centième de pouce près, et les poids de rupture obtenus ont été ramenés par le calcul à ce qu'ils auraient été si les barres avaient présenté les dimensions exactes que l'on s'était proposé de leur donner.
2	68.62	2.54	2.54	503	524	524	3	
3	274.50	5.08	2.54	354	531	531	5	
4	137.24	5.08	2.54	954	1062	1062	5	
5	68.62	2.54	5.08	1013	1062	1062	5	
6	137.24	7.62	2.54	1988	2367	2367	2	
7	68.62	2.54	7.62	1398	1572	1572	4	
8	401.74	5.08	5.08	483	717	587	3	
9	274.50	5.08	5.08	835	1062	871	7	
10	137.24	5.08	5.08	1626	2124	1742	7	
11	274.50	7.62	5.08	1829	2367	1858	9	
12	137.24	5.08	7.62	2446	3186	2612	10	
13	401.74	7.62	7.62	1459	2367	1473	3	
14	205.86	7.62	7.62	3052	4013	3073	8	

On voit, par l'examen de ce tableau, combien l'application de la formule privée du facteur (1.18=0,07D) donne des résultats éloignés de ceux de l'expérience lorsque les barreaux atteignent une forte épaisseur, et en même temps avec quel degré d'approximation l'emploi du facteur corrige les premiers résultats obtenus.

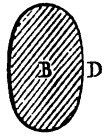
Nota. Il paraît que certains mélanges de fonte, variant suivant le calibre, ont la propriété de relever beaucoup le taux de la résistance des grosses pièces. Lorsqu'on ne peut disposer des fontes propres à ces mélanges, on peut arriver à peu près au même résultat en soumettant la première barre obtenue à une nouvelle fusion. Le gain de résistance que l'on retire de cette opération est, à ce qu'il paraît, d'environ 25 à 30 pour 100.

53. Les autres formes de section pleine que l'on peut rencontrer en pratique sont les sections circulaire, elliptique et triangulaire. En modifiant les coefficients numériques des formules théoriques qui leur sont applicables, comme on vient de le voir pour la section rectangulaire, ces formules deviennent :

Pour la section circulaire

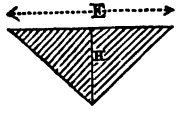
$$\frac{1}{4}PL=\frac{1}{5}TD^3; \qquad (25)$$

Pour la section elliptique,



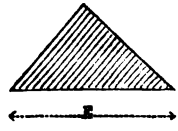
$$\frac{1}{4}PL=\frac{1}{5}TBD^2; \qquad (26)$$

Pour la section triangulaire le solide reposant sur une arête,



$$\frac{1}{4}PL=\frac{1}{12}TEH^2; \qquad (27)$$

Pour la section triangulaire le solide reposant sur sa base,



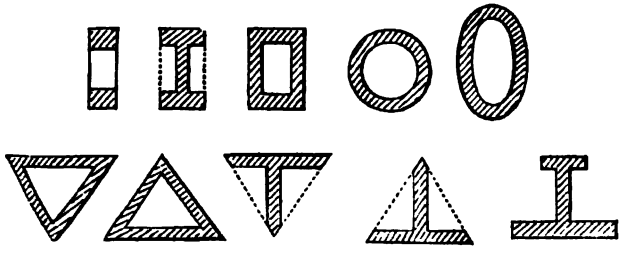
$$\frac{1}{4}PL=\frac{1}{4}TEH^2. \qquad (28)$$

En comparant toutes ces formules entre elles, on trouve qu'à hauteur et section égales, la forme la plus résistante est celle du triangle reposant sur sa base, ce qui, du reste, est confirmé par l'expérience. Quoi qu'il en soit, il est utile de faire observer ici que le nombre d'expériences sur ces trois dernières formes est extrêmement restreint, et que les formules qui s'y appliquent auraient besoin d'une sanction plus décisive. Je dois dire cependant qu'elles sont confirmées jusqu'à un cer-

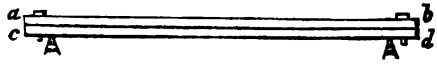
tain point indirectement par les expériences relatives aux solides évidés qui dérivent de ces formes.

Solides à section évidée.

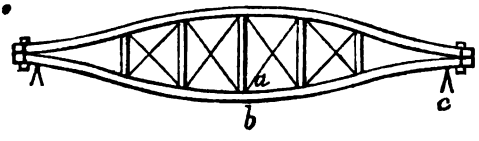
54. Les solides de cette espèce dérivent des quatre formes de section pleine examinées précédemment. On obtient en effet, en les évidant symétriquement à l'intérieur on à l'extérieur, les formes suivantes :



55. Je n'examinerai la première de ces formes que pour avoir l'occasion d'indiquer une particularité assez remarquable appartenant à tous les solides de section évidée.



Si l'on accole ensemble deux barres de fer méplat et qu'on les boulonne par les extrémités, on obtiendra un solide à section rectangulaire pleine dont la résistance sera facile à déterminer d'après ce qui précède. On peut se proposer de rechercher ce que deviendra cette résistance si l'on vient à intercaler entre les deux barres des coins ou des entretoises de manière à augmenter de plus en plus la hauteur du solide. Pour cela on peut faire deux hypothèses : ou bien l'on supposera la tension en a plus petite qu'en b, en raison de la distance de ce point au centre de la pièce; ou bien l'on admettra que ces deux points sont



suffisamment éloignés du centre pour qu'il n'y ait pas d'erreur sensible à regarder les tensions en a et b comme étant égales.

Dans le premier cas, la formule de la résistance est :

$$\frac{1}{4}PL = \frac{1}{3}\frac{TE(H^3 - H'^3)}{H},$$

et l'on trouve que le rapport R entre la résistance du solide dont la hauteur est ainsi augmentée et sa résistance primitive est exprimée par

$$R = \frac{3n^2 - 3n + 1}{n}, \qquad (29)$$

n désignant le nombre de fois que la nouvelle hauteur H contient la première. On tire de cette formule que, pour des hauteurs successivement égales à 2, 4, 6, 8, 10 fois la hauteur primitive, la résistance devient égale à 3, 9, 15, 21, 27 fois la résistance que le solide présentait lorsque les deux barres étaient accolées.

Dans la deuxième hypothèse, la formule de la résistance est :

$$\frac{1}{4}PL = \frac{1}{3}TE(H^2 - H'^2),$$

et le rapport R prend la forme plus simple

$$R = 2n - 1, \qquad (30)$$

et dans ce cas, les hauteurs augmentant comme

2, 4, 6, 8, 10,

les résistances ne sont plus respectivement que

3, 7, 9, 15, 19 fois

la résistance primitive. Je dirai de suite que cette dernière hypothèse, qui s'éloigne le plus de la théorie, est cependant celle que confirme l'expérience ; ce qui simplifie beaucoup la recherche et l'établissement des formules relatives aux solides à sections évidées.

Solides évidés en fer. Ponts tubulaires.

56. Parmi les solides évidés en fer, les seules formes qui aient été employées ou qui doivent l'être sont celles qui dérivent des

sections pleines quarrée ou rectangulaire et circulaire. Les formules applicables à ces divers cas sont les suivantes :

Formes dérivées de la section rectangulaire pleine,

$$\frac{1}{4}PL = \frac{1}{3}F(EH^2 - E'H'^2), \quad (*) \qquad (31)$$

E′ et H′ désignant respectivement la largeur et la hauteur intérieure du solide.

Forme dérivée de la section circulaire pleine,

$$\frac{1}{4}PL = \frac{1}{5}F(D^3 - D'^3), \qquad (32)$$

D′ indiquant le diamètre intérieur du tube.

On remarquera qu'au lieu de la lettre habituelle T qui représente la résistance du métal à la traction, j'ai introduit dans la formule la nouvelle désignation F. C'est parce que le solide peut céder par traction ou par compression, et F représente l'une ou l'autre de ces deux résistances, suivant le cas. On voit par là que la première chose à faire pour calculer la résistance d'un tube en fer, c'est de déterminer la valeur de F. Or, j'ai trouvé qu'il faut pour cela opérer de la manière suivante :

1° *Calculer la résistance à la traction de la partie inférieure du solide en tenant compte de l'affaiblissement résultant du mode d'assemblage des parties ;*

2° *Calculer la résistance à la compression de la partie supérieure comme si elle faisait partie d'un pilier quarré ayant pour longueur celle du tube entre ces appuis ; pour côté la dimension transversale et horizontale du pilier proposé, et supposer que le tube doit céder latéralement ;*

3° *Introduire pour* F *dans la formule le taux par cent. quarré de la plus petite des deux résistances trouvées.*

Nota. Cette règle n'est applicable qu'autant que la partie

(*) Je ferai remarquer ici, une fois pour toutes, que les mêmes lettres, dans les diverses formules, conservent toujours la signification qui leur a été donnée dans les paragraphes précédents.

supérieure est d'une seule pièce ou composée de plusieurs assemblées bout à bout avec couvre-joints, c'est-à-dire de la manière la plus favorable à la résistance.

87. *Exemple.* M. Stephenson a fait rompre un tube en fer soudé à section rectangulaire, présentant les dimensions suivantes :

$$L=182^{c}.88, \quad H=10^{c}.953, \quad H'=10^{c}.001,$$
$$E=5^{c}.873, \quad E'=4.921, \quad e=0.476, \text{ ép. de la tôle.}$$

Le poids de rupture a été de 3200 kilogrammes.

Le tube étant d'une seule pièce, le taux de résistance à la traction n'éprouve aucune réduction, et doit être, d'après les expériences de M. Stephenson, de 3100^{k} par cent. quarré environ. Reste à déterminer le taux de la résistance à la compression. Or, en formant un pilier creux quarré présentant les dimensions suivantes :

$$L=182.88, \quad E=5.873, \quad e=0.476,$$

et calculant sa résistance par la formule,

$$R=\frac{A+B'}{2}+B,$$

on trouve

$$\frac{R}{S}=2270 :$$

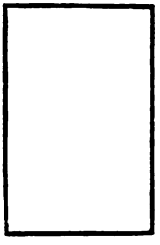
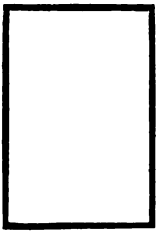
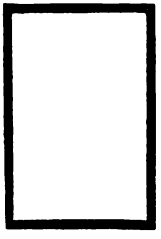
donc le tube devra céder par compression, puisque les sections sont égales en haut et en bas. C'est en effet ce qui a eu lieu. Le poids de rupture calculé par la formule

$$\frac{1}{4}PL=\frac{1}{3}F(EH^{2}-E'H'^{2})$$

est 3500^{k}, qui ne diffère que d'un dixième de celui de l'expérience. Il est probable que le tube aura éprouvé une perte de force par la chaude nécessaire pour la soudure.

Pour montrer combien l'on peut compter sur la méthode de calcul que je viens d'indiquer, je donne ci-après le tableau des expériences de M. Hodgkinson sur des tubes offrant les dimensions les plus variées. En comparant les résultats du calcul avec ceux de l'expérience, on voit que l'approximation obtenue est aussi grande qu'on peut l'espérer en pratique.

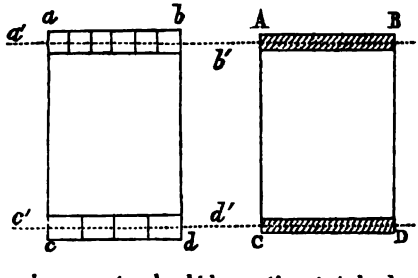
38. *Poutres creuses ou tubes expérimentés par M. Hodgkinson*

1 N° d'ordre des expériences.	2 Longueur des tubes. L	3 Hauteur verticale. H	4 Largeur. E	5 Epaisseur de la tôle. e	6 Forme de la section.	7 Poids de rupture trouvé par expérience, augmenté de la moitié du poids du tube.	8 Résistance maximum à la compression du toit, calculée.	9 Poids de rupture calculé.	10 Poids du tube.	11 OBSERVATIONS.
	c	c	c	c		k	k	k	k	
1	114.30	7.620	4.826	0.076		305	1302	303	1.96	En général, les résultats calculés dans les petits tubes sont inférieurs à ceux de l'expérience; cela doit venir de ce que je n'ai pas tenu compte du retour d'équerre donné à la tôle à la partie supérieure pour la rivure.
2	114.30	7.620	4.953	0.153		1119	1906	878	4.38	
3	228.60	14.732	9.652	0.165		1439	1378	1264	16.09	
4	228.60	15.240	9.906	0.336		4547	1959	3896	48.96	En outre, on ne peut s'attendre à obtenir une approximation aussi grande dans des tubes de tôle mince que dans ceux de tôle forte, parce qu'on ne peut en déterminer l'épaisseur aussi exactement que dans ces derniers, et parce que la plus légère erreur dans cette détermination influe naturellement davantage sur le résultat.
5	914.40	60.960	38.100	0.315		5872	823	6238	495.56	
6	914.40	60.325	39.370	0.691		23780	1396	22181	1172.04	En admettant que la rivure dans la partie inférieure des grands tubes réduise d'un cinquième environ le taux de la résistance de cette partie (ce qui n'est pas loin de la vérité), et l'abaisse par conséquent à 2500 kilogr. par centimètre quarré environ, on voit que dans tous les cas ces tubes ont dû céder par compression: c'est ce que l'expérience a confirmé.
7	914.40	60.960	39.370	1.333		59518	1955	61825	2164	
8*	914.40	60.325	40.005	1.110 0.691		53709	1810	53740	1322	* Ce tube est le même que le n° 6, dont on a renforcé l'épaisseur à la partie supérieure.

Remarque. — La manière de procéder est la même lorsque les parties supérieure et inférieure du tube ne sont pas d'égale épaisseur. Seulement, au lieu d'introduire pour H′ dans la formule la valeur $H-(e+e')$, e et e' désignant les épaisseurs du toit et du plancher, il faut y mettre $H-2\varepsilon$, ε désignant l'épaisseur de la partie que les calculs préparatoires ont fait reconnaître comme la plus faible.

C'est de cette manière qu'a été calculé le dernier tube du tableau, dont l'épaisseur à la partie inférieure n'est que les deux tiers de celle du toit, et l'on voit que le résultat du calcul cadre on ne peut mieux avec celui de l'expérience.

59. *Ponts-tubes à cellules.*—Cette méthode de calcul s'applique non seulement aux tubes qui précèdent, mais à ceux, quelles que soient leurs dimensions, dont le toit et le plancher sont cellulaires. Voici, en quelques mots, la marche à suivre. Soit *abcd* la section d'un tube à cellules : on mènera par le centre de gravité des cellules les droites horizontales $a'b'$ et $c'd'$;



puis, ayant calculé la section totale du toit et du plancher, on les répartira également de chaque côté des lignes $a'b'$, $c'd'$, de manière à substituer aux cellules une simple épaisseur de métal de même section. On obtiendra ainsi un nouveau tube ABCD de même longueur et de même poids que le précédent, mais de hauteur différente, et dont on obtiendra facilement la résistance par la méthode indiquée pour les simples tubes des expériences de M. Hodgkinson.

Ce procédé étant appliqué à tous les cas d'expériences sur le grand tube modèle rend parfaitement compte de tous les résultats obtenus.

60. Je n'ai trouvé nulle part des cas d'expérience sur la forme de section double T, mais il paraît rationnel de supposer que

cette forme rentre dans la précédente et doit être calculée de la même manière.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que les calculs précédents ne s'appliquent qu'à des poutres isolées reposant sur deux appuis. Si l'on avait à calculer la résistance de poutres double T comme celles actuellement employées dans la construction des nouveaux planchers d'habitation, il faudrait substituer à F, dans la formule, la résistance du fer à la traction; car il est évident que ces poutres ne peuvent plus céder, comme des poutres isolées, par la partie supérieure, qui, dans ce cas particulier, se trouve parfaitement maintenue par les voûtes en poterie. Cette observation s'applique naturellement aussi aux pièces ou poutres de pont qui se trouveraient dans la même position par suite d'une disposition semblable ou équivalente.

Résistance des poutres évidées en fonte de formes diverses.

61. En rassemblant tous les faits d'expérience que j'ai rencontrés dans divers auteurs, j'en ai conclu les formules suivantes pour les solides dont la section dérive :

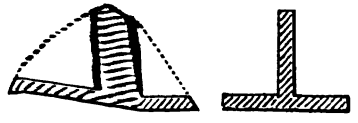
De la forme quarrée ou rectangulaire pleine,

$$\frac{1}{4}PL=0,22T(EH^2-E'H'^2). \quad (33)$$

De la forme circulaire pleine,

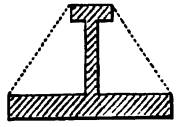
$$\frac{1}{4}PL=0,14T(D^3-D'^3). \quad (34)$$

De la forme triangulaire,



$$\frac{1}{4}PL=0,175T(EH^2-E'H'^2). \quad (35)$$

De la forme trapézoïdale,



$$\frac{1}{4}PL = mT(EH^2 - E'H'^2). \qquad (37)$$

$m = (0.22 - 0.01r)$, r désignant le rapport des sections des renforts supérieur et inférieur.

Cette dernière forme a été imaginée, ou du moins préconisée par M. Hodgkinson, et, suivant cet auteur, pour qu'elle soit dans les meilleures conditions possibles, la tige verticale doit être très mince et les renforts dans le rapport de 6 1/2 à 1. Dans ce cas, le coefficient m est égal à 0,155, et la formule devient

$$\frac{1}{4}PL = 0{,}155T(EH^2 - E'H'^2). \qquad (37)$$

Dans toutes ces formules, $H' = H - 2e$; e désignant l'épaisseur du renfort inférieur du solide.

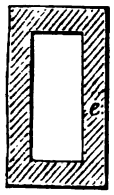
Contrairement au fer, la fonte cède toujours par traction. Cela tient à l'énorme différence qui existe entre la résistance à la traction et la résistance maximum à la compression de ce métal; différence qui est telle, que, dans la fonte résistant comme pilier, il faut que la longueur atteigne 40 ou 50 fois le diamètre ou la plus petite dimension transversale, pour que le taux de la résistance à la compression descende au-dessous du taux de la résistance à la traction. C'est pourquoi j'ai conservé dans les formules relatives à la fonte la désignation T, qui représente la résistance de la fonte à la traction par cent. quarré.

En comparant les formules 23, 25, et 31, 32, on voit que pour les solides évidés en fer, les coefficients numériques sont les mêmes que ceux des solides à section pleine, dont ils dérivent. Il n'en est pas de même pour la fonte, comme on peut le voir par la comparaison des formules 23, 25, 28, et 33, 34, 35. Les coefficients pour les solides évidés en fonte sont plus petits; cela a été nécessaire pour mettre les formules d'accord avec

l'expérience. Il est digne de remarque que, quoique ces formules aient été arrêtées indépendamment les unes des autres, les nouveaux coefficients se sont trouvés être les 0,70 des coefficients des formes pleines primitives.

62. Je vais maintenant confirmer les formules qui précèdent par des exemples.

M. Stephenson a fait rompre quatre tubes rectangulaires en fonte, dont les dimensions suivent :



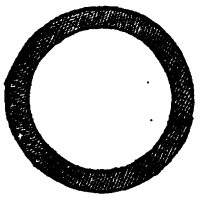
$L = 182^{c}.880,$
$H = 10^{c}.263,$
$H' = 8^{c}.359,$
$E = 5^{c}.607,$
$E' = 3^{c}.703,$
$e = 0^{c}.952.$

Appliquant la formule, on a :

$$P = 0{,}22\,\frac{4 \times 1600(5.607 \times [10.263]^2 - 3.703 \times [8.359]^2}{182.88} = 2554^{k}.$$

Le poids moyen de rupture réel a été 2352 k.; il ne diffère de l'autre que d'un douzième environ, ce qui est une approximation tout à fait suffisante.

Le même ingénieur a fait également expérimenter jusqu'à la rupture trois tubes circulaires présentant les dimensions suivantes :



$L = 182.88,$
$D = 9.840,$
$D' = 7.938,$
$e = 0.952.$

Appliquant la formule, on a :

$$P = 0{,}14\,\frac{4 \times 1600([9.84]^3 - [7.938]^3)}{182.88} = 2217^{k}.$$

L'expérience a donné pour poids de rupture 2,330 kil.

Pour servir de terme de comparaison aux poutres à deux renforts inégaux, M. Hodgkinson a rompu un certain nombre de poutres à un seul renfort présentant la section ci-contre. Les six premières poutres ayant offert peu de différence dans leurs dimensions, je les ai groupées en une seule présentant en moyenne les dimensions suivantes :

$$L=137.16,\quad H=13.017,\quad e=1.348,\quad H'=10.231,\quad E=5.826,\quad e'=1.186,\quad E'=4.640.$$

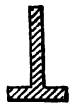
(321)

En appliquant la formule on trouve :

$$P=0{,}175\,\frac{4\times 1600\,(5.826\times[13.017]^2-4.64[10.321]^2)}{137.16}=4025^k.$$

Le poids de rupture moyen pour les six poutres a été de 3951 k. Ces résultats diffèrent bien peu de celui du calcul.

M. Hodgkinson fait observer que les deux premières poutres se sont voilées d'une manière sensible avant la rupture, ce qui semblerait indiquer qu'elles étaient sur le point de rompre par compression. D'où il suit qu'il ne faudrait pas, dans ces sortes de poutres, amincir la tige verticale vers le bout, mais lui donner une épaisseur uniforme ; et l'on éviterait sans doute ainsi l'effet signalé par M. Hodgkinson.



M. Francis Bramah a fait des expériences sur des poutres d'une forme à peu près semblable à la précédente, mais d'une épaisseur uniforme. Les dimensions de ces poutres étaient celles ci-contre :

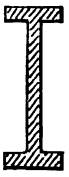
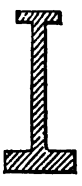
$$L=91\text{ cent.}\quad H=7.62,\quad E=3.81,\quad e=e'=1.27,\quad T=1620.$$

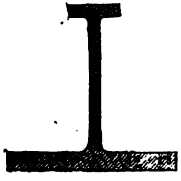
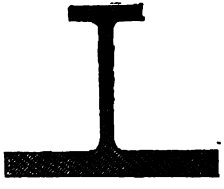
En appliquant à ces poutres la même formule qu'à celles de M. Hodgkinson, on trouve $P=2{,}361^k$. La moyenne de rupture des poutres expérimentées avait été de 2389^k. Cette moyenne diffère peu du résultat du calcul, mais les résultats extrêmes s'en écartaient d'un sixième environ, tant au dessus qu'au dessous. Ce n'en est pas moins une confirmation de la

formule; d'autant plus que j'ai quelque raison de croire que les dimensions de ces poutres n'ont pas été prises avec le soin extrême qu'y apporte toujours M. Hodgkinson, et qui est de la plus rigoureuse nécessité si l'on veut obtenir par le calcul des résultats aussi approchés que possible de ceux de l'expérience.

63. Voici maintenant le tableau d'une partie des expériences de M. Hodgkinson sur les poutres à renforts inégaux, dans lequel j'ai mis en regard les résultats du calcul et ceux de l'expérience. Ces documents sont extraits de son ouvrage : *On the Properties of cast iron*, p. 426.

Tableau des expérienees de M. Hodgkinson sur des poutres en fonte.

Numéros des expériences.	Forme de la section dans le milieu de la poutre.	Renfort supérieur. Largeur.	Renfort supérieur. Epaisseur.	Renfort inférieur. Largeur.	Renfort inférieur. Epaisseur.	Rapport des sections des renforts ou r.	Epaisseur de la tige verticale.	Surface de la section de rupture.	Poids de la poutre.	Poids de rupture.	Résistance par centimètre quarré de section.	Résistance calculée.	OBSERVATIONS.
		cent.	cent.	cent.	cent.			cent. q.	kil.	kil.	kil.		
1		4.445	1,067	4.495	0.990	1 approximativemt	0.736	18.1935	16.32	3028	166.40	3027	Cette poutre a été calculée par la formule : $\frac{1}{4}PL=0.22T(EH^3-E'H'^3)$, T étant égal à 1600 kil. On a pris ici la moyenne des largeurs et épaisseurs des renforts.
2		4.419	0.660	4.521	1.397	2	0.762	18.5160	17.68	3341	180.038	3482	Cette poutre et les suivantes ont été calculées par la formule : $\frac{1}{4}PL=mT(EH^3-E'H'^3)$, m étant égal à $(0.22-0.01r)$
3		9.718	0.762	5.334	1.448	4	0.813	29.4838	18.13	3749	192.32	3664	
4	Même modèle que le n° 3.	»	»	»	»	»	»	»	»	3746	»	»	

5		2.667	0.906	7.823	1.295	4.5 approxi-mativem[t]	0.774	21.7418	20	4963	223.66	4566	
6		4.064	0.800	10.566	1.346	4	0.965	29.0322	25.84	6638	226.84	6104	La rupture s'est effectuée par le bas à 2 cent. et demi du milieu de la poutre.
7		3.962	0.800	13.132	1.422	5.5	0.863	32.2580	30.50	7585	235.12	7349	
13		5.842	0.711	16.84	1.631	6.5	0.851	41.9154	34	10541	251.28	9723	

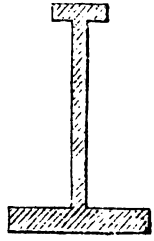
Les six premières poutres avaient été coulées à plat et horizontalement dans le sable; les autres l'avaient été dans une position semblable à celle qu'elles devaient occuper.

Toutes ces poutres avaient dans leur renfort inférieur la forme du solide d'égale résistance. C'est là en effet, bien plus que dans la hauteur, qu'il importe d'élégir les poutres de ce système, puisque c'est dans cette partie que se trouve la plus grande épaisseur de fonte. Malheureusement il arrive rarement en pratique que l'on puisse diminuer le renfort inférieur vers les extrémités; car le plus souvent c'est par l'intermédiaire de ce renfort que la poutre supporte la charge qui lui est destinée.

On remarquera qu'en général les résultats du calcul sont un peu inférieurs à ceux de l'expérience. Cela tient à deux causes : d'abord à ce que je n'ai pas eu égard, dans le calcul, aux congés de raccord de la tige avec les renforts, et, en second lieu, à ce qu'en déterminant la règle pour trouver le coefficient m, j'ai préféré rester au dessous des résultats de l'expérience pour le cas des poutres expérimentées, parce que ces poutres présentent de faibles épaisseurs, et qu'en procédant ainsi, il y avait quelque probabilité que la formule donnerait des résultats plus approchés avec des poutres dont l'épaisseur serait égale à celle d'où l'on est parti pour toutes les autres expériences, c'est-à-dire 2 cent. et demi environ.

64. J'ajouterai encore à ce qui précède deux applications sur deux poutres en fonte de grande portée.

Poutres rompues par M. O'March de Leeds :

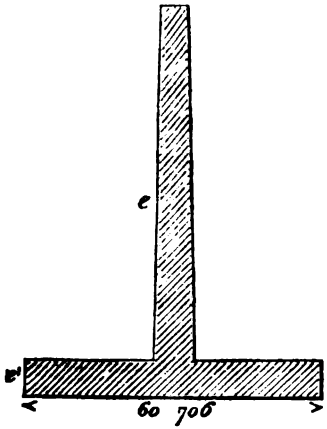


Distance entre les appuis, $L = 548^{c}.\ 64$,
Hauteur au milieu, $H = 43\ .\ 18$,
Epaisseur de la tige, $e = 1\ .587$,
Epaisseur du renfort infér., $e' = 3\ .175$,
Largeur de ce renfort, $E = 20\ .955$,
Largeur du renfort supér., $E'' = 7\ .\ 62$,
Epaisseur de ce renfort, $e'' = 1\ .905$.
Il résulte de ces dimensions que $H' = 36{,}830$,

et $E'=19{,}368$, $r=4.50$, et, par conséquent, $m=0.175$.

La moyenne de rupture sur trois poutres pareilles, dont deux avaient été obtenues au cubilot et une au four à réverbère, a été d'environ 25 *tonnes*, y compris la moitié du poids de la poutre. En appliquant la formule et attribuant à T une valeur de 1600 kil., la fonte étant de qualité supérieure, on trouve :

$$P=0.175\frac{4\times 1600(20.955\times[43.18]^2-19.368\times[36.83]^2)}{548.64}=26{,}000 \text{ kil.}$$



Résultat suffisamment approché pour la pratique.

Autre exemple :

$L=703.58$,
$H=91.694$,
$E=60.706$,
$e=7.925$,
$e'=8.585$,
$H'=75.844$,
$E'=52.121$.

L'épreuve de cette poutre a été poussée jusqu'à 155 tonnes environ sans obtenir la rupture. L'application de la formule

$$\frac{1}{4}PL=0{,}175\,T(EH^2-E'H'^2)$$

donne pour résultat $P=365$ tonnes; mais, sans aucun doute, la résistance réelle, si elle avait pu être obtenue, eût été inférieure à ce résultat, à cause de l'épaisseur considérable du renfort et de la tige, qui, d'après ce que l'on a vu précédemment, a pour effet de diminuer considérablement le taux de la résistance. Dans ce cas, les expérimentateurs anglais sont d'avis qu'il faudrait déterminer ce taux d'après une barre quarrée dont la dimension transversale serait égale à l'épaisseur moyenne de la poutre à calculer. Il faudrait donc, ou avoir

une série d'expériences sur des barres de tous les calibres, ou, dans chaque cas particulier, rompre une barre quarrée ayant l'épaisseur en question. Mais on peut se dispenser de l'un et de l'autre au moyen du facteur (1.18—0,07D) introduit dans la formule 24; et pour avoir, selon toute apparence, dans le cas actuel un poids de rupture peu éloigné du poids réel, il doit suffire de multiplier le premier résultat obtenu par ce facteur. D étant ici égal à 8.25, on a définitivement

$$P=365\times0.60=219 \text{ tonnes.}$$

J'ai choisi ce dernier exemple à dessein, pour montrer qu'en pareille circonstance il ne faudrait pas s'en tenir au premier résultat obtenu, mais le modifier comme il vient d'être dit; ou bien, ce qui revient au même, commencer l'opération en réduisant, par l'application du même facteur, la valeur même de T.

De la meilleure forme à donner à une poutre en fonte.

65. Les expériences dont je viens de rapporter une partie dans le dernier tableau ont été faites uniquement en vue de déterminer la meilleure forme à donner à une poutre en fonte, c'est-à-dire celle qui présente la plus grande résistance par rapport à sa section. M. Hodgkinson a trouvé, ou plutôt s'est cru en droit de conclure de ses expériences que la meilleure forme était celle à deux renforts inégaux dont les sections seraient dans le rapport de 5 ou 6 1/2 à 1. Or, si l'on compare la formule qui s'adapte au cas le plus favorable des expériences de M. Hodgkinson avec celle qui s'applique à la poutre à un seul renfort, on trouve, contrairement à l'assertion de l'expérimentateur, que cette dernière doit être la plus résistante. Ce résultat était facile à prévoir, en partant de cette considération que, la section triangulaire pleine étant la plus résistante parmi les sections primitives, il était probable que, la section dérivée de celle-là serait aussi la plus résistante parmi les formes

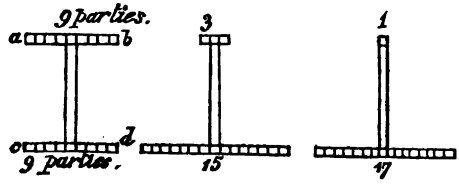
évidées. Il me reste maintenant à expliquer en quelques mots où gît l'erreur de M. Hodgkinson.

Cet auteur est parti dans ses expériences (voir le tableau ci-dessus) de la forme à deux renforts égaux, qui était considérée avant lui comme la meilleure. Il rompit cette poutre et lui trouva une résistance, par cent. quarré de section, de 166 kilogrammes.

Il expérimenta ensuite sur une deuxième poutre de même hauteur et de même longueur dans laquelle les renforts étaient dans le rapport de 1 à 2, et la résistance par cent. quarré se trouva être cette fois de 180 kilog.

Il continua de la sorte ses expériences sur une série de poutres dont la hauteur et la longueur restaient les mêmes, et dans lesquelles le rapport des renforts allait toujours croissant, et il trouva qu'à mesure que ce rapport augmentait, la résistance par cent. q. de section augmentait aussi. Mais il importe de faire observer ici une circonstance très importante à laquelle M. Hodgkinson n'a pas pris garde : c'est que, dans la série de poutres expérimentées par lui, le rapport de la section totale du solide à celle de la tige verticale allait aussi en croissant. Ainsi, par exemple, pour la première poutre ci-dessus à renforts égaux, le rapport était égal à 2 environ ; pour la poutre n° 13, ce rapport était presque égal à 5. Or, qui ne voit qu'en opérant de la sorte, M. Hodgkinson accorde à son système de poutre un bénéfice qu'il refuse à la poutre à deux renforts égaux de Tredgold ? Car il est clair que, si, dans cette dernière, on enlevait à la tige verticale la plus grande partie du métal pour la reporter sur les deux renforts et de manière à ce que la section de cette tige fût à la section totale dans le rapport de 1 à 5, rien ne prouve qu'alors la poutre de M. Hodgkinson continuerait à l'emporter sur l'autre.

C'est en opérant de la même manière que M. Hodgkinson a trouvé sa forme de poutre supérieure à celle à un seul renfort ; mais il est hors de doute maintenant que cette comparaison est tout aussi défectueuse que l'autre.



Pour que la comparaison fût juste et rationnelle, voici comment il aurait fallu, à mon avis, que M. Hodkinson opérât :

Il aurait dû prendre une première poutre *abcd* à renforts égaux et la rompre; puis, en partant de celle-là, en former une seconde dans son système en transportant en bas une partie du métal du renfort supérieur, et cela sans rien changer au rapport de la section de la tige à la section totale; puis enfin en composer une troisième en supprimant le renfort supérieur tout-à-fait. De cette manière chaque poutre n'aurait différé des autres qu'en ce qui concernait le système particulier auquel chacune d'elles appartient; et je ne fais pas de doute qu'en agissant ainsi l'on aurait obtenu la confirmation des vues que j'ai exposées plus haut.

Du reste, cela résulte, comme je l'ai déjà dit, de la comparaison des formules pratiques applicables à ces divers cas. Pour rendre cette comparaison plus frappante, je terminerai cet article par le calcul de 3 poutres dans les conditions que je viens de fixer :

1re poutre. $\left\{\begin{matrix}L=100,\ H=10,\ H'=9,\\ E=\ 9,\ E'=\ 8,\ \ r=1,\end{matrix}\right\}$ on trouve $P=5453^k$

2e poutre. $\left\{\begin{matrix}L=100,\ H=10,\ H'=9,\\ E=\ 15,\ E'=14,\ \ r=5,\end{matrix}\right\}$ — $P'=6760^k$

3e poutre. $\left\{\begin{matrix}L=100,\ H=10,\ H'=9,\\ E=\ 17,\ E'=16,\end{matrix}\right\}$ — $P''=7571^k$

On voit par là que la poutre de M. Hodgkinson l'emporte, en effet, sur celle de Tredgold, mais de bien peu, et qu'elle est inférieure à la forme composée d'un seul renfort.

Observation générale. Bien que l'on puisse trouver que cela résulte assez clairement des tableaux et des indications qui accompagnent la plupart des formules et applications qui précèdent, je crois utile de prévenir le lecteur, pour parer aux omissions qui pourraient exister, que dans tous les cas les dimensions des solides sont supposées exprimées en centimètres et les poids en kilogrammes.

CHAPITRE IV.

DE L'EFFET DES ACTIONS DYNAMIQUES SUR LA RÉSISTANCE DU FER ET DE LA FONTE.

66. Toutes les formules de ce mémoire, comme on a dû le remarquer, ne donnent que la charge de rupture *statique*, c'est-à-dire celle qui agit au repos. Mais cela ne suffit pas pour la pratique, car il est rare de rencontrer des cas où le fer et la fonte se trouvent dans une position aussi simple. Le plus souvent une poutre est soumise à des flexions répétées dues à l'application et à l'enlèvement successif et périodique de la charge, à des chocs, au passage rapide de lourds fardeaux. S'il est vrai que, dans le premier cas, celui de l'action statique et indéfinie de la même charge, l'on pourrait, sauf l'inconvénient d'une trop grande flexion (*), charger une poutre d'un poids très voisin de celui de rupture, peut-on s'approcher autant de ce poids dans les circonstances que l'on vient d'énumérer? Ces circonstances n'ont-elles pas pour effet d'être équivalentes à un certain accroissement de la charge, capable de faire dépasser le point de rupture, même lorsqu'on en est très éloigné? Et, le cas échéant, à quelle distance faudrait-il se maintenir de la charge de rupture instantanée statique pour être certain que, dans aucun cas, elle ne puisse être atteinte? C'est là un problème dont la solution intéresse le praticien au plus haut degré et sans laquelle même tout ce qui précède ne lui serait d'aucune utilité.

(*) Il est bien entendu que, dans aucun cas, en pratique, je ne recommanderai de pousser la charge aussi loin. Ce que j'en dis ici est au point de vue purement spéculatif. Dans l'application, il faut tenir compte de la flexion de la poutre, qui ne doit pas être visible à l'œil, de l'existence possible de quelques défauts cachés, de la variation de la résistance du métal; aussi, comme on le verra plus loin, convient-il, dans le cas le plus favorable, de ne pas charger une poutre au delà de la moitié de son poids de rupture instantanée statique.

Je dirai de suite qu'une solution générale, c'est-à-dire telle que l'on puisse, dans un cas donné quelconque, à l'aide de modifications introduites dans les formules précédentes, déterminer exactement les dimensions convenables à donner à une poutre, une telle solution n'existe pas et n'existera probablement jamais, tant le sujet est hérissé de difficultés. Tout ce que l'on peut faire, dans l'état actuel des résultats d'expériences et des ressources de l'analyse, c'est de se placer dans des conditions pratiques usuelles, et de déterminer d'une manière un peu large, pour ces cas exceptionnels, les limites dans lesquelles on peut trouver *la sécurité*. C'est ce que je vais essayer de fixer au moyen des travaux de la commission d'enquête anglaise.

Pour embrasser tous les cas qui peuvent se rencontrer dans les constructions, les commissaires se sont proposé de résoudre les deux questions suivantes.

Premièrement. Le métal qui a été long-temps exposé à des chocs et à des vibrations subit-il dans l'arrangement de ses molécules un changement capable de l'affaiblir ?

Secondement. Quelle est la mesure de l'effet mécanique du choc et du passage rapide de lourds fardeaux sur des barres ou des poutres en métal (*) ?

Effets des chocs et des vibrations sur la structure et la ténacité du métal.

Opinions de divers ingénieurs, et en particulier de M. R. Stephenson.

67. Sur cette première question, l'interrogatoire subi par les praticiens appelés devant la commission a montré parmi eux une grande divergence d'opinions. Des ingénieurs ont rapporté que des pièces de fer forgé, après avoir été long-temps exposées à des vibrations, comme des essieux de wagons, des chaînes de grues employées à soulever de grands poids, finissent souvent par se rompre et présentent dans leur cassure un aspect cris-

(*) Tous les faits rapportés dans ce chapitre sont le plus souvent une traduction à peu près littérale du résumé même des commissaires.

tallin, qu'ils attribuent, ainsi que l'affaiblissement de la ténacité, à un changement graduel produit par les vibrations dans la structure intérieure du métal. Au nombre des faits que les commissaires anglais regardent comme concluants en faveur de cette manière de voir, ils ont cité le suivant : Si l'on taraude l'extrémité d'un morceau de fer bien fibreux par le procédé ordinaire, qui produit une action vibratoire très marquée, et qu'on le rompe ensuite, on trouve que la partie filetée est beaucoup plus cristalline que l'autre. Quelques ingénieurs ont été d'avis que cette structure particulière du métal est le résultat d'une fabrication défectueuse, et ont même prétendu que l'action vibratoire était incapable de la produire. D'autres ont exprimé l'opinion que l'aspect cristallin peut être communiqué au fer fibreux de diverses manières, par exemple en chauffant une barre au rouge cerise et la plongeant ensuite dans l'eau froide, et répétant plusieurs fois cette opération, ou bien en le martelant à froid pendant une demi-heure environ.

M. Robert Stephenson est d'avis que l'effet des vibrations sur le métal est pratiquement nul. Il a cité l'exemple d'un balancier d'une machine de Cornouailles qui, à sa connaissance, reçoit depuis vingt ans huit à dix chocs par minute équivalant à 55 tonnes, sans que rien dans la machine ait jamais indiqué le moindre changement dans la forme du balancier; la machine étant bien ajustée, la plus légère augmentation dans la flèche de ce balancier serait bientôt remarquée. Il a encore donné pour exemple des fermes de 15 m. de portée sur le chemin de fer de Blackwall qui, ayant été examinées avec soin, après avoir livré passage à 120,000 trains de douze voitures, n'ont pas décélé la moindre altération. Dans tous les cas, suivant cet ingénieur, pour décider ce point d'une manière certaine, il restera toujours une question préalable assez difficile à résoudre, celle de savoir si la pièce soumise à l'expérience n'avait pas avant d'être essayée et rompue la structure cristalline qu'on lui trouve après.

En ce qui concerne les essieux de wagons, la question serait

souvent insoluble, car M. Stephenson pense qu'avec les moyens dont on dispose on ne peut obtenir des pièces de 10 cent. de diamètre environ entièrement fibreuses.

Je ferai remarquer ici que je ne vois de bien sensé dans ce qui précède que les dernières observations de M. Stephenson. Pour le reste, j'avoue qu'il me paraît difficile de comprendre que des ingénieurs aient pu, d'après les faits rapportés ci-dessus, se former des opinions *contradictoires* sur la question de savoir si les chocs et les vibrations ont pour effet d'altérer la texture du métal. En effet, on voit d'un côté des ingénieurs qui ont observé ou cru observer quelques cas d'altération, conclure dans le sens affirmatif; et de l'autre des ingénieurs qui n'en connaissent pas d'exemples conclure au contraire dans le sens négatif. Or ces conclusions, en tant qu'absolues, exclusives, sont aussi irrationnelles l'une que l'autre. Loin de s'exclure elles se concilient parfaitement : car, si chaque ingénieur, au lieu de s'arrêter au fait pur et simple, s'était occupé de rechercher, de *mesurer* l'intensité du choc ou des vibrations, dans chaque cas, par rapport à la résistance de la pièce qui y était soumise; il aurait trouvé sans doute que les chocs ou les vibrations pouvaient altérer la texture du métal, ou ne point l'altérer du tout; que cela ne dépendait que du *degré de l'intensité de l'action*, et il aurait au moins vu que les faits ci-dessus ne sont contradictoires qu'en apparence.

Mais il paraît que je n'ai relevé dans tout ceci qu'une faute de logique; car les nouvelles expériences de M. Brunel qui suivent ne permettent même pas de s'arrêter à cette dernière conclusion.

Expériences de M. Brunel.

68. M. Isambard Brunel ne regarde pas l'apparence cristalline que l'on a remarquée dans les barres rompues par une suite de chocs comme l'indication d'un changement dans la structure intime du métal. Suivant cet ingénieur, l'aspect de la cassure dépend à la fois de la manière dont un barreau a été

rompu et des autres circonstances dans lesquelles cette rupture a été effectuée. Ainsi M. Brunel a obtenu dans une même barre de fer de qualité inférieure, d'un côté une cassure entièrement fibreuse, de l'autre une cassure moitié cristalline, moitié fibreuse. Dans le premier cas, la rupture avait été produite par un coup lent d'un lourd marteau; dans le second, par un coup sec et rapide d'un marteau plus léger. Dans une autre circonstance, une barre de 1 pouce et demi d'épaisseur reçut préalablement une centaine de coups à froid d'un marteau à vapeur dans le dessein de la rendre cassante et de lui communiquer la structure cristalline; cette barre, ayant été ensuite rompue par un coup lent d'un fort marteau, a donné au contraire une très belle cassure fibreuse. Un grand nombre d'expériences du même genre confirment ces résultats.

La température a aussi une influence très marquée sur l'aspect de la cassure. Ainsi, à une température basse, sans martelage préalable, on obtient plus facilement l'aspect cristallin. M. Brunel conclut de là que le fer ne devient pas alternativement cristallin ou fibreux, mais qu'il possède une disposition naturelle, un état moléculaire, qui lui permettent de donner l'une ou l'autre de ces deux apparences suivant le choc qu'il reçoit et les circonstances qui l'accompagnent. D'après cet ingénieur, il se passerait dans le fer quelque chose d'analogue à ce que l'on observe dans une roche qui a ses plans de stratification et de clivage, et qui se sépare suivant l'un ou l'autre de ces deux plans, selon la manière dont le coup est appliqué.

En résumé, d'après les expériences de M. Brunel, il faudrait renoncer à juger le fer, et sans doute aussi la fonte, par les divers aspects qu'on lui connaît aujourd'hui; et ne pas conclure, par exemple, de l'aspect cristallin que présenterait un rail ou un essieu que le fer en était de mauvaise qualité, ou qu'ayant été originairement bon, il a fini par perdre de sa qualité et de sa ténacité. Bref, dans l'état actuel des choses, on ne peut affirmer qu'il y ait un rapport certain entre la qualité ou la ténacité du fer et les divers aspects connus de sa cassure.

Jusqu'à ce que ce point ait été éclairci par de nouvelles expériences, il n'y a donc pas lieu de rechercher si les chocs, les vibrations, les flexions, ont pour effet de changer la structure du métal. Le seul problème à résoudre, et c'est du reste celui que l'ingénieur a le plus d'intérêt à connaitre, c'est celui de savoir si ces diverses actions prolongées finissent par lui faire perdre de sa ténacité. A cet égard, il y a eu encore une différence d'avis aussi peu rationnelle que celle que j'ai déjà relevée. On verra, en effet, que cette différence se résout encore par une question d'*intensité* de la cause d'altération. Sans aller plus loin, on conçoit aisément que dans une certaine limite les chocs, les vibrations, les flexions, etc., n'aient pas le pouvoir d'affaiblir le métal, mais qu'ils l'acquièrent dès que cette limite est dépassée. Que l'on prenne, par exemple, un morceau de fil de fer et qu'on le reploie modérément sur lui-même, et l'on pourra se livrer à cette opération indéfiniment sans l'affaiblir aucunement ; tandis qu'il est constant que c'est par une action de ce genre, mais plus prononcée, qu'on finit par le rompre. C'est de cette manière que les commissaires anglais paraissent avoir compris la question, car dans les expériences que je vais rapporter on verra qu'il ne s'est point agi pour eux de tracer le rapport qui existe entre l'affaiblissement du métal et sa structure apparente, mais bien de déterminer jusqu'à quelle limite on pouvait pousser telle ou telle action, sans rien faire perdre au métal de sa force primitive.

Effets sur la résistance des poutres en fonte des flexions réitérées produites par des chocs, le mouvement d'un excentrique ou d'un poids mu avec lenteur. Résistance au choc de barres libres ou chargées. Effet des charges animées de grandes vitesses, etc. (*Expériences de MM. Hodgkinson, Henry James, R. Willis, Douglas Galton.*)

Flexions produites par des chocs long-temps répétés.

60. Une barre de fonte de trois pouces d'épaisseur (7.62) étant placée dans un hangar sur des appuis éloignés de $4^{m}27$, un

lourd boulet fut suspendu au comble par un fil de fer de 5m48 de longueur, de manière à toucher la barre latéralement en son milieu. En écartant le boulet de la verticale, comme un pendule, dans un plan perpendiculaire à l'axe de la pièce, et le laissant ensuite échapper, il produisait des chocs horizontaux dont la force pouvait être variée au gré de l'expérimentateur, en changeant la dimension du boulet ou la hauteur de la chute. Un certain nombre de barres de la dimension de celle ci-dessus, quelques unes plus petites, furent soumises par le moyen de cet appareil à une suite de chocs qui, dans certains cas, furent portés jusqu'à 4,000. La force du choc variant, dans chaque série d'expériences, suivant la dimension des barres et l'effet que l'on voulait produire, on arriva de cette manière au résultat général suivant :

Lorsque le choc était suffisant pour faire fléchir la pièce de la moitié de sa flèche maximum (c'est-à-dire de celle qui correspond à sa rupture par l'application d'un poids mort), aucune barre ne pouvait supporter une volée de 4,000 coups. Mais toutes celles qui n'étaient pas défectueuses y résistaient très bien lorsque le choc n'avait pour effet que de produire une flèche égale au *tiers seulement de la flèche maximum*.

Flexions produites par le mouvement d'un excentrique.

70. D'autres barres en fonte des mêmes dimensions furent soumises à l'action d'un excentrique mu par une machine à vapeur. Par ce moyen, elles étaient lentement infléchies par leur milieu, et revenaient avec une égale lenteur à leur position primitive. Le nombre des flexions communiquées aux barres par ce procédé était considérable; et, pour quelques unes, il fut porté jusqu'à 100,000, à la vitesse de quatre par minute environ; dans d'autres expériences, les barres, en même temps qu'elles étaient infléchies, étaient, en outre, soumises à de violentes trépidations. Les résultats de ces expériences furent les suivants :

Lorsque les flexions produites n'étaient que le tiers de la flexion maximum, les barres ne perdaient rien de leur résistance, ce dont on s'assurait en les rompant par un poids placé en leur milieu; mais il suffisait d'environ 500 flexions consécutives pour les rompre lorsque ces flexions atteignaient la moitié de celle de rupture.

Flexions produites par un poids mu lentement.

71. Dans une autre série d'expériences, des barres semblables aux précédentes furent soumises à l'action d'un poids égal à la moitié de celui de rupture, promené lentement d'une extrémité à l'autre de ces barres. Une barre saine ne parut pas visiblement affaiblie par 69,000 passages du poids.

Conclusions des expériences précédentes.

72. Les commissaires anglais ont tiré de ces expériences cette conclusion : que les dimensions des poutres en fonte doivent être déterminées de manière à ce qu'elles ne subissent jamais de flexion excédant le tiers de celle de rupture. Et, pour donner à cette conclusion une signification plus précise, je ferai observer qu'il existe peu de poutres qui supportent le même poids d'une manière permanente, et qui, par conséquent, conservent toujours la même flèche. Le plus ordinairement, les poutres, telles que celles d'un plancher de magasin, d'une salle de réunion, d'une bibliothèque, d'un réservoir à eau, etc., reçoivent des charges qui varient d'un instant à l'autre, et, par conséquent, les flèches qu'elles prennent subissent des oscillations qui les placent dans l'une ou l'autre des deux dernières conditions qui viennent d'être rapportées. Il s'ensuit que l'on peut admettre que, dans ces circonstances, il convient que leur flèche ne dépasse pas le tiers de celle de rupture; ce qui revient à dire à peu près que, si l'on veut donner à ces poutres les dimensions convenables pour résister indéfiniment, il faut mettre à la place du poids de rupture, dans les formules de ce mémoire, trois fois la charge maximum qu'elles peuvent avoir à supporter dans leur milieu. Pour le cas où la

charge serait invariable, comme celle d'un linteau de porte ou de croisée, il suffirait, sans doute, de porter à 2 le coefficient de sécurité ci-dessus.

Le fer paraît moins affecté que la fonte dans les mêmes circonstances, et permettrait d'élever un peu la charge maximum.

Résistance de barres en fonte à des chocs horizontaux.

73. Il résulte des expériences que des barres de fonte de même longueur et de même poids frappées horizontalement par le même boulet présentent la même résistance au choc, quelle que soit la forme de leur section transversale, pourvu que l'aire de cette section ne change pas. Ainsi, des barres ayant une section rectangulaire de $15^{c}.20 \times 3^{c}.80$, placées sur des appuis distants de $4^{m}.27$, ont exigé le même nombre de coups pour être rompues dans les deux sens, ainsi qu'une barre quarrée de même section et de même longueur. Ces expériences ont aussi fait voir que les flèches produites sur des barres de fer étaient proportionnelles à la vitesse acquise; dans la fonte, ces flèches croissent dans une proportion plus rapide que les vitesses.

Résistance de barres libres ou chargées à des chocs verticaux.

74. Si l'on charge de poids uniformément répartis des barres de fonte, elles présentent une résistance au choc vertical plus grande que celle qu'elles auraient étant déchargées. Ainsi, par exemple, dans une expérience, M. Hodgkinson rompit une barre quarrée de trois pouces d'épaisseur reposant sur des appuis distants de 14 pieds 7 pouces, au moyen d'un boulet de 303 livres tombant d'une hauteur de 33 *pieds*, le choc étant reçu par l'intermédiaire d'un coussin en plomb de 4 livres. Dans une autre expérience, ayant chargé une barre semblable de manière à ce que son poids fût doublé entre les supports, il fallut élever le boulet à une hauteur de 66 *pieds* pour produire la rupture.

Effet de charges animées de grandes vitesses.

75. L'effet des charges animées de grandes vitesses est la question qui intéresse le plus les constructeurs de chemins de fer. Sur cette question, l'avis de la plupart des ingénieurs anglais était que : la flèche produite sur une poutre en fonte par un poids animé d'une grande vitesse était plus petite que celle qu'il aurait produite au repos ; et, lorsqu'ils avaient été à même d'observer un accroissement de la flèche par la charge en mouvement, ils l'avaient attribué aux secousses que le train éprouvait sur les inégalités de la voie à la jonction des rails, ou à d'autres causes du même genre.

Cet avis n'étant point partagé par quelques ingénieurs et par des membres de la commission, et la question étant d'ailleurs de la plus haute importance, la commission crut devoir se livrer à un grand nombre d'expériences, sinon pour la résoudre, du moins pour éclaircir tout doute à cet égard. A cet effet, elle entreprit deux séries d'expériences :

Dans la première, on construisit à Portsmouth, sur une assez grande échelle, un plan incliné terminé par un plan horizontal, et l'on y établit une voie de fer dont les rails étaient distants de 91 centimètres. De divers points de ce plan incliné, dont la partie supérieure était élevée de $12^{m}.40$ au-dessus de la partie horizontale, on faisait descendre un chariot qui pouvait recevoir, au maximum, une charge de deux tonnes environ. Ce chariot était destiné à éprouver, à diverses vitesses, des barres de fonte de $2^{m}.74$ de longueur formant une partie de la voie dans le plan horizontal ; la vitesse maximum pouvait atteindre 47 kilomètres à l'heure.

Au moyen de cet appareil, on s'assura que la flèche produite par un poids passant sur les barres était la plus grande lorsque ce poids était en mouvement. Par exemple, lorsque le chariot, chargé de 507 kilog., était placé au repos sur une paire de barres en fonte de $2^{m}.74$ de longueur, 10 cent. de largeur

et 38 millim. d'épaisseur, la flèche était de. . . . . 1°.5
à une vitesse de 16 kilom. à l'heure, cette flèche devenait 1°.6
à une vitesse de 20 kilom. id. id. . . . 3°.8
c'est-à-dire, dans ce dernier exemple, plus du double de la flèche statique.

La vitesse augmentant dans cette proportion l'effet d'un poids donné, on en conclut qu'il faudrait, pour rompre une barre avec une certaine vitesse, un poids beaucoup moindre que celui qu'elle exigerait au repos. En effet, on trouva par expérience qu'une charge de 805 kilog. à la vitesse de 48 kilom. à l'heure suffisait pour rompre les barres ayant les dimensions ci-dessus; tandis que, pour produire le même effet sans vitesse, il fallait élever la charge à 1880 kilog.

76. Malheureusement, ces expériences, en résolvant la question de principe, laissent subsister une grande incertitude à l'égard des effets que l'on obtiendrait sur des poutres en fonte de chemins de fer, aux plus grandes vitesses qui aient été employées; et elles ne peuvent servir, en conséquence, à proportionner les dimensions des poutres à ces effets. Cela tient à deux causes: d'abord aux conditions particulières dans lesquelles on s'est placé pour obtenir des effets sensibles, conditions toutes différentes de celles que l'on rencontre dans l'application; et en second lieu à la difficulté, voisine de l'impossibilité, que la théorie éprouve de tirer de ces expériences une loi susceptible de s'appliquer à des cas en dehors des limites dans lesquelles les expérimentateurs se sont renfermés. Ainsi, pour montrer combien les circonstances des expériences étaient loin de celles de la pratique, il suffira de dire que, pour obtenir des accroissements de flèches visibles dans le premier cas, on opérait sur des barres tellement minces que la flèche statique était d'environ un vingtième de la longueur de la barre; tandis que, dans les poutres de chemins de fer, la flèche produite par la charge maximum n'est souvent que le centième de la précédente. En outre, le rapport de la masse des barres expérimentées au poids en mouvement variait de 3 à 14. Dans les chemins de fer, la

charge peut, dans certains cas rares, atteindre cinq à six fois celle de la portion de pont qui la supporte ; mais il arrive plus fréquemment que cette proportion est beaucoup moindre, comme de 1 1/2 à 3, par exemple, et souvent encore c'est le contraire qui a lieu, c'est-à-dire que le poids du pont est beaucoup plus fort que la charge. En résumé, d'après les calculs de M. Stokes, et supposant que l'inertie du pont est très petite par rapport à celle de la charge, il résulterait que, dans le cas des expériences, l'accroissement de flèche dû au mouvement de la charge varierait de 0.04 à 1.46 de la flèche statique ; tandis que, dans les ponts de chemins de fer, elle varierait de 0,0017 à 0,1 de la flèche statique, suivant la charge et la vitesse. En tenant compte de l'inertie, il paraîtrait que, dans certaines limites, celle du pont aurait pour effet d'augmenter la flèche statique ; dans d'autres, elle aurait un effet contraire. Quant à la détermination de cette limite, elle dépend de la solution de formules inabordables pour le praticien.

Je suis d'avis que les mathématiciens distingués de la commission qui se sont occupés de cette question l'ont abordée à un point de vue trop élevé et trop général. C'est là, souvent, le tort des savants théoriciens qui s'occupent de recherches expérimentales. Pour eux le point particulier qu'il s'agit d'élucider se noie bientôt dans une question générale ; et il n'est pas rare de voir qu'après bien des efforts et des calculs, ils arrivent à une formule qui embrasse tout.... excepté le point en vue duquel les expériences avaient été entreprises. Je ne puis croire qu'il n'y avait pas une manière beaucoup plus simple de trouver une solution suffisamment approchée pour la pratique. Ainsi, par exemple, il est notoire qu'il existe en Angleterre une multitude de ponts au dessus en fonte de toutes les dimensions. Il est certain, en outre, que les dimensions de ces ponts ont été déterminées de manières très différentes par les divers ingénieurs (*) ; de sorte qu'en cherchant un peu, on aurait

(*) En effet, les commissaires rapportent que les ingénieurs, suivant les

trouvé une série de ponts de chaque espèce dans lesquels les poids de rupture calculés auraient varié entre trois et dix fois la charge maximum statique. Dès lors, en faisant passer sur ces ponts des machines aux plus grandes vitesses possibles, on aurait mesuré l'accroissement de flèche dû à l'action dynamique, et l'on aurait pu déterminer, pour les ponts de chaque portée, le coefficient de sécurité pour lequel cet accroissement était négligeable. Je suppose, par exemple, que plusieurs expériences aient fait voir que des ponts, dont le poids de rupture calculé était égal à quatre fois la charge maximum statique, prenaient, sous l'influence de cette charge en mouvement, une flèche égale à celle qui appartiendrait au tiers de la charge de rupture statique : il en serait résulté que ces ponts auraient pu être regardés comme suffisants, puisqu'il est démontré par expérience (§ 70) qu'une poutre peut éprouver indéfiniment, sans altération, des flèches de cette importance.

77. Je citerai en détail les seules expériences de ce genre qui aient été faites en Angleterre; et, dussé-je passer pour profane et même pour pis, j'avouerai que je donnerais volontiers, pour vingt expériences pareilles, les quatre ou cinq cents de MM. Henry James et Willis, augmentées des savantes dissertations et analyses de ce dernier et de M. Stokes de l'Université de Cambridge. Dans ces expériences, on faisait arriver sur la voie d'un pont de chemin de fer une lourde machine et son tender; on mesurait la flèche statique qui en résultait; puis on la faisait passer à des vitesses variables, et, au moyen d'un appareil très simple, on obtenait les flèches dynamiques. Voici, pour chaque cas, les dimensions des poutres, les charges, les vitesses et les résultats obtenus.

---

opinions diverses qu'ils ont à l'égard de l'effet des charges en mouvement, prennent des coefficients de sécurité qui varient de 3 à 10. On appelle *coefficient de sécurité* le nombre par lequel il convient de multiplier la charge maximum pour tirer de la formule les dimensions de la poutre capable de résister indéfiniment.

Pont d'Ewell (Epsom and Croydon railway).

Dimensions du pont, son poids, celui de la machine et du tender.		Vitesses par heure en kilomètres.	Flèches.
	m		c.
Portée.	14.63	0	0.54
Nombre de poutres pour chaque voie.	2	27	0.43
Hauteur de la poutre. . .	1.0668	34	0.58
Largeur du renfort infér.	0.5080	36	0.57
Epaisseur id.	0.0762	59	0.62
Poids de deux poutres.	20t	82	0.59
Poids de la plate-forme de la moitié du pont.	10		
Total	30		
Poids de la machine.	25t 20		
Poids du tender.	14t,00		
Total	39t,00		

N. B. **Pour diminuer l'effet de la charge en mouvement, on avait donné aux poutres, et par suite à la voie, une convexité dans le sens opposé à celui où la flexion tend à se produire.**

Pont de Godstone (South-Eastern railway).

Dimensions du pont, son poids, celui de la machine et du tender.		Vitesses par heure en kilomètres.	Flèches.
	m		c.
Portée.	9.144	0	0.48
Nombre de poutres pour 2 voies	3	34	0.58
Hauteur de la poutre. . . .	0.9144	44	0.56
Largeur du renfort inférieur.	0.3810	80	0.63
Epaisseur id.	0.0571		
Poids de deux poutres	15t		
Poids de la plate-forme entre les poutres	10		
Total	25t		
Poids de la machine	21		
Poids du tender	12		
Total	33t		

En calculant la résistance de ces poutres d'après les dimen-

sions ci-dessus, et en les supposant d'une épaisseur uniforme et à un seul renfort, on trouve que

le poids de rupture de la 1re est de. . . . 108 tonnes
celui de la 2e de. . . . . 105 »

Dans les deux cas, le poids de la plate-forme, de la machine et de son tender, équivaut, pour chaque poutre, à une charge placée au milieu, égale environ au sixième de la charge de rupture. Cependant l'effet produit par la charge dynamique est bien différent dans les deux expériences, puisque dans la première l'accroissement de la flèche statique, pour une vitesse de 82 k., est d'un dixième environ de cette flèche, tandis que dans la seconde cet accroissement est de près d'un tiers de la flèche statique pour une vitesse à peu près égale.

Il me semble qu'il est permis d'attribuer cette différence à la manière dont la voie avait été établie sur le premier pont; et cela démontrerait, quoi qu'en dise M. R. Willis, l'efficacité de cette disposition. On verra du reste, tout à l'heure, qu'elle est d'ailleurs fondée sur une raison assez plausible.

Il suivrait encore de ces expériences que l'accroissement de pression de la charge dû à la vitesse serait bien loin de faire atteindre aux poutres une flèche égale au tiers de celle de rupture; et que, par conséquent, elles présentent une parfaite sécurité. Il est même probable que l'on aurait pu les faire moins fortes sans le moindre danger.

Effet de l'application instantanée d'une charge, sans choc.

78. Il y a deux manières de charger une poutre d'un certain poids. Ou bien l'on divise ce poids par parties, que l'on applique successivement et avec précaution; la poutre arrive à prendre, par ce moyen, sans oscillation, sa *flèche statique;* c'est ce que l'on obtient plus facilement encore en composant la charge de sable, que l'on verse doucement. Ou bien l'on applique cette charge en masse et tout d'un coup; dans ce cas, la charge prend une certaine vitesse, et fait dépasser à la poutre sa *flèche statique*, pour l'y faire revenir par une série d'oscillations.

M. Henry James a prouvé, par de nombreuses expériences, que la flèche instantanée produite dans cette circonstance était le *double de la flèche statique*. Le moyen employé pour appliquer la charge sans choc était très ingénieux, et garantit que l'effet obtenu n'était pas dû à d'autre cause qu'à l'action instantanée de la charge.

Ce résultat, *qui ne paraît pas avoir attiré l'attention des commissaires*, est cependant un des plus importants que l'on ait obtenus, et il trouve immédiatement son application dans les ponts de chemins de fer. Car, quel est le principal effet, sur ces ponts, d'une charge animée d'une vitesse horizontale plus ou moins grande? C'est celui d'une application plus ou moins rapide de cette charge sans choc. Et comme, pour obtenir une application *instantanée* de la charge, en la faisant arriver horizontalement, il faudrait une vitesse infinie, il s'ensuit que l'effet obtenu dans les expériences de M. Henry James est *la limite* des effets que peuvent produire sur des ponts de chemins de fer les charges animées de vitesses variables. En d'autres termes, la flèche due à une charge animée d'une grande vitesse horizontale ne peut jamais atteindre le double de la flèche statique. Par conséquent, si l'on calcule les dimensions des poutres d'un chemin de fer de manière à ce que la charge maximum ne les fléchisse, au repos, que du sixième de la flèche de rupture statique, il est évident qu'aucune vitesse possible, quelque grande qu'elle soit, ne pourra faire atteindre à cette flèche le tiers de celle de rupture, et les poutres calculées comme il vient d'être dit présenteront une sécurité parfaite.

Il est vrai que l'on peut objecter à cela qu'il se produit à la jonction des rails des chocs qui doivent avoir pour effet d'accroître la flèche; qu'en outre, cette flèche doit encore être augmentée par l'action de la force centrifuge développée par la charge se mouvant suivant la courbe verticale qu'elle produit dans le pont. Mais à cela l'homme pratique peut répondre que les chocs en question sont réellement de peu d'importance et parfaitement négligeables; que l'on peut d'ailleurs en atté-

nuer l'effet, autant que l'on veut, en mettant tous ses soins à la pose de la voie dans la traversée d'un pont. Quant à l'effet de la force centrifuge, il est prouvé, par l'exemple du pont d'Ewell, que l'on y pare efficacement en donnant aux poutres et à la voie une certaine convexité dans le sens opposé à celui où la flèche tend à se produire. Il n'y a donc rien à retrancher à la conclusion que j'ai tirée plus haut des expériences de M. James sur la manière de calculer les dimensions d'une poutre de pont de chemin de fer, et le degré de sécurité que l'on en retire.

79. En raison de l'importance de la question actuelle, je ne puis omettre de citer, à l'appui de la manière de voir qui vient d'être formulée, les résultats théoriques obtenus par M. Cox, et dont M. Callon a déjà donné la traduction dans nos Comptes-rendus de l'année 1848. J'ai recours d'autant plus volontiers à ce théoricien que ses résultats sont nettement posés, et que deux d'entre eux ont été confirmés par l'expérience ; ce qui permet d'espérer que les autres n'en sont pas éloignés.

M. Cox pose d'abord en principe :

Premièrement, que la flexion d'un solide élastique chargé en son milieu est proportionnelle à la charge ;

Secondement, que cette loi a lieu quelle que soit la forme du solide (rectangulaire, triangulaire ou en T droit ou renversé.)

D'après les expériences de M. Hodgkinson, ces principes sont confirmés pour le fer dans des limites très étendues. Dans les poutres en fonte, la flexion croît dans une proportion plus grande que la charge ; mais, dans la pratique, on peut admettre, sans erreur notable, la loi de proportionnalité pour les charges comprises entre 0 et le tiers de celle de rupture.

Partant des principes ci-dessus, M. Cox établit que, dans le cas d'un poids unique placé au milieu d'une poutre ou d'une charge uniformément distribuée :

1° La flexion et la pression *statiques* sont doublées par l'ap-

plication instantanée de la charge (ce qui est confirmé par l'expérience de M. Henry James, § 78);

2° La flexion et la pression produites par une charge en mouvement est toujours inférieure à celles qui résulteraient de l'application instantanée de cette charge (ceci me paraît également établi par le raisonnement du § 78);

3° La considération de l'inertie du pont est négligeable;

4° Le surcroît de pression occasionné par la force centrifuge développée par la charge en suivant la ligne infléchie de la voie sur un pont est exprimé par

$$Q = \frac{\frac{2}{3} f P}{t^2},$$

f étant la flèche statique produite par la charge P, et t le temps, en secondes, que cette charge met à franchir le pont;

5° On diminue considérablement la pression exercée sur des poutres en donnant à la voie qu'elles supportent une certaine convexité (ce qui est confirmé par l'exemple des ponts d'Ewell et de Godstone).

D'après la formule, si l'on suppose un convoi P animé d'une vitesse de 90 kilomètres à l'heure, il traversera en une seconde un pont de 25 mètres de portée. Si la flèche statique produite par le convoi est de 10 centimètres, on aura pour le surcroît de pression exercé

$$Q = \frac{\frac{2}{3} \times 0.10 \times P}{1^2} = \frac{1}{15} P.$$

Cet excédant de pression est très faible, et il le serait bien plus, même avec la vitesse exceptionnelle de 90 kil. à l'heure, si, au lieu de la flèche statique de 10 centimètres, on en avait supposé une de 2 1/2 seulement, ce qui serait plutôt dans les limites des flèches admises en pratique. Dans ce cas, en effet, l'accroissement de pression dû à la force centrifuge ne serait plus que le $\frac{1}{60}$ de la valeur de P; et l'on conçoit combien il

doit être facile alors d'atténuer ou même d'annuler un pareil effet par la disposition adoptée dans le pont d'Ewell.

80. Les résultats qui précèdent ne s'appliquent qu'à tous les systèmes de ponts dont la forme peut se rapporter à celle d'une poutre appuyée par les extrémités. Ils laissent donc le praticien dans une complète ignorance sur la question de savoir quel peut être l'effet d'une charge en mouvement sur un pont suspendu en chaînes ou en fil de fer. Dans ce cas, l'effet n'est pas seulement celui d'une charge posée plus ou moins rapidement sur le pont; mais il s'y joint, surtout lorsque cette charge est composée d'une réunion d'hommes marchant d'un pas cadencé, un mouvement oscillatoire vertical dont l'amplitude va toujours en augmentant, et qui doit avoir pour résultat d'augmenter l'action de la charge dans une proportion énorme. Bien que ce fait soit de la plus haute gravité, et que l'on doive lui attribuer la chute de presque tous les ponts suspendus qui ont cédé, on n'a pas encore songé à l'éclaircir par des expériences. Pour toute précaution et pour parer aux accidents, on a imaginé simplement de faire rompre le pas aux troupes qui traversent les ponts suspendus, et l'on n'a pas réfléchi que, pour avoir la marche assurée, l'homme tend et revient naturellement à mettre son pas d'accord avec le mouvement du tablier. Quelques mathématiciens prétendent qu'aucun pont suspendu n'est capable de résister à l'action dont il s'agit, et qu'il suffit, pour produire un accident, d'un nombre très limité de pas cadencés consécutifs. Ce nombre varierait entre 5 et 12 suivant la portée et la flèche des câbles ou des chaînes des ponts existants. Il se peut que ces nombres soient exagérés. Ils présentent d'ailleurs l'incertitude qui appartient naturellement à toute spéculation purement théorique. Mais il est néanmoins certain qu'il y a là pour tous les ponts suspendus une cause accidentelle de destruction à laquelle il paraît difficile, sinon impossible, d'obvier, à moins d'en modifier notablement la construction, en leur donnant, par exemple, la rigidité de ceux construits dans les autres systèmes.

CHAPITRE V.

DES DIVERSES CAUSES D'ALTÉRATION OU D'AFFAIBLISSEMENT DU FER ET DE LA FONTE ET DES MOYENS DE CONSERVATION. — DES EFFETS DE LA TEMPÉRATURE.

Action de l'air, sec, humide, salin.

81. L'air sec paraît sans action sur le fer et la fonte; mais on peut dire que cette circonstance favorable ne se rencontre jamais en pratique. A l'air extérieur, tantôt sec, tantôt humide, *le fer en barres et la fonte* contractent une légère couche de rouille qui les préserve, comme un vernis, de toute oxidation ultérieure. Le fer paraît plus oxidable que la fonte, et d'autant plus qu'il est plus pur et d'un plus petit échantillon: ainsi, le fil de fer de bonne qualité s'altère plus vite et plus profondément que tout autre. Comme exemple de la longue durée, à l'air extérieur, du fer en barres, Rondelet cite le fer des vitraux des églises gothiques; d'anciennes grilles, qui ont plusieurs siècles d'existence; les anciens supports de réverbères des Tuileries, du Cours-la-Reine. Navier, dans son ouvrage sur les ponts suspendus, mentionne une chaîne en fer tendue d'un rocher à l'autre, entre les deux pics qui dominent la ville de Moustiers (département des Basses-Alpes), et qui aurait plus de quatre cents ans d'existence. Il cite encore des ponts de chaîne, en Chine, d'une origine très ancienne, et, entre autres, le pont de Chouka, dont l'origine remonte à une époque tellement reculée que les habitants lui donnent une origine fabuleuse.

Le fer et la fonte, exposés sans cesse dans des lieux bas à l'action de l'humidité, s'oxident de plus en plus; la rapidité de l'oxidation est souvent accrue par les émanations d'une nature corrosive qui se produisent dans cette situation.

82. *L'air salin* ou chargé de vapeurs d'eau de mer a une action éminemment destructive sur le fer et la fonte. Muschenbroeck a fait la remarque que les fers exposés à cet air, en Hollande,

s'oxidaient plus en huit jours qu'ils ne le faisaient en un an dans l'intérieur de l'Allemagne. Comme preuve plus décisive encore de l'intensité de cette action, je citerai la balustrade en fer qui avait été placée au sommet de la Colonne de la Grande-Armée à Boulogne. Cette balustrade, bien que protégée par plusieurs couches de peinture, fut trouvée au bout de quinze ans oxidée jusqu'à une profondeur d'un demi-centimètre environ. Elle a été, depuis, démontée et remplacée par une autre en bronze.

Action de l'eau pure, de l'eau de mer, etc.

83. L'eau pure, ou même celle des rivières, ne paraît pas affecter beaucoup le fer et la fonte. Rondelet rapporte avoir vu des fers, provenant d'anciennes constructions hydrauliques, qui étaient restés sous l'eau pendant plus de trente ans, et qui étaient en aussi bon état que du fer neuf. Il est supposable qu'il en est à peu près de même pour la fonte (*).

84. Sous l'influence de l'eau de mer, la fonte éprouve une altération très-remarquable. De nombreux exemples, rapportés dans divers ouvrages, et notamment dans les *Annales des mines*, font voir qu'au bout d'un séjour de plusieurs années dans l'eau de mer, la fonte se transforme en plombagine, dépourvue, comme on sait, de toute solidité. En présence de ces exemples, on ne s'explique pas l'usage qui s'est introduit récemment, en Angleterre, d'employer la fonte, sous forme de pilots pleins ou creux ou de plaques de fondation, dans des ouvrages baignés par l'eau salée; puisque, d'après ce qui vient d'être dit, il doit

(*) Suivant M. Thenard, la fonte, recouverte d'eau et abandonnée à elle-même, se décompose très lentement; le fer s'oxyde et se détache de la masse, qui se trouve alors transformée en une matière semblable à la plombagine, etc. Mais je ferai observer que l'exemple que ce chimiste cite à l'appui de son assertion est relatif à des canons en fonte qui étaient restés 50 ans au fond de la mer, c'est-à-dire dans l'eau *salée*.

arriver un temps où la fonte ne présentera plus une résistance suffisante. Cette nouvelle méthode peut se justifier lorsque, au lieu de pilots d'un petit diamètre, on emploie des tubes très grands, comme ceux d'un pont de chemin de fer construit sur la Tamise, à Windsor. Dans ce cas, on peut déblayer le tube à l'intérieur et y couler du beton; en sorte que, si la fonte vient à manquer, il reste un noyau solide sur lequel on peut compter. Mais, encore une fois, on ne voit pas ce qui peut préserver d'une ruine plus ou moins éloignée les ouvrages assis sur simples pilots en fonte baignés par l'eau de mer. Il paraîtrait que le fer se conserve mieux que la fonte dans l'eau de mer; ainsi, les ancres, les organeaux, les échelles scellés aux murs de quais d'un port, les chaînes de bouées, les gonds et ferrures de portes d'écluses, présentent, relativement, une plus grande durée (*). Du reste, il est un fait assez remarquable à noter : c'est qu'un emploi de fer d'où résulte un déplacement fréquent, des frottements, des vibrations, est favorable à la conservation du métal à l'air extérieur ou dans l'eau. Ainsi, tous les ingénieurs de chemins de fer ont eu occasion de remarquer la prompte oxidation des rails empilés dans un chantier à l'air libre ou employés sur des voies peu fréquentées, comme celles des sablières; et, au contraire, le bon état de conservation de toutes les faces de ces rails sur les voies principales. M. Fairbairn cite à l'appui de cette thèse la durée assez longue des steamers en service actif, et leur prompte dégradation dès qu'ils sont au repos. On peut encore ajouter à cela, comme terme de comparaison aux ancres qui sont à bord des navires, celles perdues que l'on retrouve au fond des ports et qui sont généralement dans un état d'oxidation très avancé.

86. Le fer au repos, employé à la mer, et alternativement mouillé et sec, paraît s'oxider plus rapidement encore que

(*) Quelle est cette durée? Je n'ai pu obtenir là-dessus aucun renseignement, bien que je me sois adressé pour cela à d'anciens amis attachés en qualité d'ingénieurs à des ports de mer.

dans toute autre circonstance. Cela peut tenir à deux causes : d'abord à ce que l'électricité dégagée par l'évaporation décompose une partie de l'eau dont le métal est couvert et lui fournit ainsi de l'oxygène à l'état naissant; et, en second lieu, à ce que l'oxide formé à la surface du fer est enlevé par les vagues et laisse à nu une nouvelle surface attaquable. Cependant il n'est pas certain que cette dénudation soit nécessaire pour qu'il s'effectue une oxidation rapide. Je tiens d'un constructeur de Boulogne-sur-Mer, M. Ad. Crouy, à qui je dois aussi le renseignement que j'ai donné précédemment sur la balustrade en fer de la colonne, l'exemple suivant sur l'effet de l'alternative de la sécheresse et de l'humidité saline : une barre en fer quarré de 4 centimètres d'épaisseur, fixée au parement du fort de l'Heurt, tantôt sèche, tantôt humide, s'est trouvée par places, et au bout de trente-cinq ans, entièrement rongée par la rouille. Il faut dire aussi qu'aucun moyen de conservation ne lui avait été appliqué.

86. L'urine et la vapeur qui se dégage des urinoirs attaquen le fer malgré la peinture. J'ai entendu dire, et cela me paraît bon à noter, que certains constructeurs de ponts suspendus se préoccupent beaucoup de mettre leurs câbles à l'abri de cette fâcheuse influence; ce qu'ils obtiennent en s'arrangeant de manière à ce que les alentours des puits d'amarragen'offrent aucun endroit propice aux promeneurs pressés par le besoin.

Action du plâtre, etc.

87. Le fer employé dans les planchers ou en scellement avec le plâtre se détériore rapidement. Je n'ai vu nulle part qu'il soit prouvé que le minium dont on le recouvre généralement le garantit de l'oxidation. Il se conserve au contraire très bien à l'intérieur de gros murs en maçonnerie au mortier, sans qu'il paraisse nécessaire pour cela de le recouvrir de peinture. Il serait à désirer, pour les planchers en fer et poteries, dont l'usage se répand de plus en plus, que l'on eût, au lieu de plâ-

tre, un ciment d'un emploi aussi facile et aussi économique. J'en ai vu un à Boulogne-sur-Mer qui admet une grande quantité de sable, et qui me semblerait assez convenable pour cet emploi.

Le soufre est aussi d'un mauvais usage avec le fer; on ne devrait jamais employer pour les scellements que le plomb ou le ciment.

Moyens employés pour garantir le fer et la fonte de l'oxidation.

88. Ces moyens sont nombreux. On emploie, suivant les circonstances et les localités : la chaux en badigeonnage ou en pâte molle, la graisse, le goudron, le *coal tar* (goudron provenant de la distillation de la houille), l'huile de lin à chaud, pure ou mêlée d'une certaine quantité de litharge et de noir de fumée; la peinture à l'huile au minium, à la céruse, etc.; la peinture galvanique à l'huile de M. Ledru et compagnie, la galvanisation par le procédé Sorel. Je vais examiner dans quels cas ces divers procédés sont employés et le degré d'efficacité qu'ils présentent.

89. A l'intérieur des bâtiments ou à l'extérieur on emploie la plupart des moyens qui viennent d'être indiqués. Mais il est des cas où ceux que l'on peut mettre en pratique sont limités à quelques uns seulement. Ainsi, par exemple, dans des édifices importants où le métal est apparent on ne peut admettre que la peinture. Dans les ateliers, les hangars ou magasins, où l'on tient purement et simplement à conserver le métal sans lui donner une belle apparence, on a ou l'on peut avoir recours à celles des substances ci-dessus qui sont les plus économiques, telles que la chaux, le goudron, la graisse.

90. La peinture ne jouit pas à l'air d'une imperméabilité parfaite; et l'on peut s'assurer, en examinant des fers peints depuis quelque temps, que l'air a pu pénétrer sous la peinture et oxider le métal, ce qui se trahit par des taches jaunâtres que l'on remarque par places et qui augmentent avec le temps. D'ailleurs l'exposition au soleil finit par faire écailler la pein-

ture; ce qui force à la renouveler de temps en temps. Mais en général on peint les gros fers, à l'air extérieur ou intérieur, plutôt pour leur donner de l'apparence que pour les conserver, puisque sans cela (§ 81) ils pourraient durer indéfiniment après s'être recouverts d'une légère couche protectrice de rouille.

91. Cette oxidation, qui est tout à fait insignifiante sous le rapport de la portion de résistance qu'elle enlève au fer d'un fort échantillon, est loin d'être négligeable lorsqu'il s'agit du fil de fer : car la couche oxidée, si mince qu'elle soit, devient ici une portion assez notable de la section du fil. D'ailleurs, le bon fil de fer, étant généralement plus pur que le fer en barres, est plus oxidable; et comme, d'un autre côté, la peinture ne paraît pas un obstacle infranchissable pour l'air, il s'ensuit qu'un câble en fil de fer présente, à section égale, une surface attaquable beaucoup plus grande. Aussi s'efforce-t-on, avec un soin tout particulier, de le soustraire à l'action de l'air. Chaque fil est d'abord passé individuellement dans un bain d'huile de lin bouillante, rendue plus siccative par l'addition d'une certaine quantité de litharge et quelquefois aussi de noir de fumée; le câble lui-même, lorsqu'il est terminé, subit aussi cette opération, puis il est peint à la manière ordinaire. Malgré ces précautions extrêmes, il est rare de rencontrer des câbles en fil de fer qui ne présentent de nombreuses taches de rouille. Mais outre les traces apparentes d'oxidation, il peut en exister à l'intérieur dont il est impossible de surveiller le progrès (*). De sorte que par le fait seul de l'oxidation, tous les ponts suspendus en fil de fer sont menacés d'une ruine inévitable et plus ou moins rapprochée. Ce résultat est d'autant plus à craindre, que l'on a quelque raison de penser (§ 19) que les ponts suspendus en fil de fer, nouvellement établis, travaillent déjà à un taux par trop voisin de leur résistance maximum, et que, par conséquent, à mesure

(*) Les câbles ne sont jamais faits d'une manière assez régulière pour éviter des cavités, dans lesquelles l'eau peut s'introduire, séjourner et y entretenir une humidité favorable à l'oxidation.

qu'ils vieillissent et se détériorent, il devient de plus en plus facile aux charges animées d'un mouvement oscillatoire vertical de leur faire atteindre la dernière limite et de les rompre.

En présence d'une pareille situation, il me paraît incontestable qu'il est du devoir d'une administration chargée de veiller à la sécurité publique, de déterminer par des essais en grand les inconnues de cet important problème. Cela fait, et supposant que les résultats soient favorables aux ponts suspendus, ce qui me semble fort douteux, il n'en sera pas moins nécessaire de soumettre ceux en fil de fer à de nouvelles épreuves de temps en temps (tous les quatre ou cinq ans par exemple), afin de s'assurer que les progrès de l'oxidation leur laissent encore une résistance suffisante.

En résumé, dans l'état actuel de nos connaissances et des moyens de conservation dont on dispose, on peut dire que le système des *ponts suspendus*, surtout celui formé de câbles en fil de fer, est non seulement mauvais, mais qu'il présente assez de danger pour que l'administration prescrive à l'égard des ponts existants les mesures de précaution les plus sévères et les plus minutieuses, et s'oppose à ce que l'on en construise de nouveaux jusqu'à ce que les praticiens soient mis en possession des éléments nécessaires pour leur donner le degré de force et de sécurité convenable.

92. *La chaux en pâte molle* conserve bien le fer dans les lieux bas et humides comme les puits d'amarrage des ponts suspendus, pourvu que l'on s'assure de temps en temps que sa consistance ne change pas. Mais c'est ce que l'on ne fait pas, et ce moyen paraît avoir été employé avec l'idée qu'il conservait le fer indéfiniment, en déchargeant le constructeur de toute surveillance. C'est ce qui en fait le danger. Il peut arriver alors, comme au pont d'Angers, que la pâte se dessèche, se fendille et laisse pénétrer les eaux pluviales chargées d'impuretés jusqu'aux barres ou câbles de retenue, qui sont bientôt attaqués par l'oxidation.

93. Dans la discussion sur les ponts suspendus qui eut lieu

au sein de la Société des ingénieurs civils à Paris, un membre recommanda la galvanisation du fil de fer par le procédé Sorel comme un moyen d'une efficacité parfaite. Il lui fut répondu que le zingage avait l'inconvénient d'altérer considérablement la ténacité du métal. Or il paraît que cette dernière assertion était purement gratuite, car, d'après un mémoire fort intéressant publié par M. Dehargne dans les *Annales des Ponts-et-Chaussées* (1851), il résulterait d'expériences faites depuis dix ans, sur une grande échelle, dans le port de Brest, que non seulement le procédé est en effet aussi efficace qu'on peut le désirer, mais que le fer galvanisé ne perd absolument rien de sa résistance.

Pour donner à ce procédé l'extension qu'il mérite par son efficacité, il reste à trouver le moyen de l'appliquer facilement au fer et à la fonte sous toutes les dimensions et dans des conditions économiques. Et cela importe d'autant plus que par le zingage, le fer et la fonte se conservent parfaitement dans toutes les positions où les autres moyens sont en défaut ; à l'air salin et à la mer, par exemple. Le brevet de l'inventeur expire cette année ; il faut espérer que cette circonstance encouragera les ingénieurs à faire des essais.

94. A l'air extérieur, M. Quettier, directeur des hauts-fourneaux de Marquise, recommande pour les grandes pièces en fonte l'enduit d'huile de lin fait à chaud. Il rapporte qu'une statue ayant reçu un pareil enduit, puis ayant été exposée à la pluie dans un jardin, n'offrait après cinq ans aucune trace de rouille. Cet industriel conseille encore l'emploi de la peinture galvanique de M. Ledru, qui offre, suivant lui, la même solidité que les autres peintures, mais qui est plus économique. Elle coûte 40 centimes le kil. en poudre, et se prépare à l'huile comme le minium et la céruse.

95. *A l'air salin* des ports de mer la peinture ne protége le fer et la fonte qu'à la condition de la renouveler assez souvent (§ 81). On emploie alors préférablement, quand on le peut, la graisse ou le goudron. A Boulogne-sur-Mer, c'est au moyen du

goudron que le génie militaire conserve ses pièces d'artillerie et ses boulets en fonte ; c'est encore avec du goudron que l'on avait enduit la grille située au pied de la Colonne dont il a déjà été question ; et cette grille était encore dans un état parfait de conservation lorsqu'on démonta la balustrade peinte qui était au sommet, pour la remplacer. Mais les usages de la graisse et du goudron sont restreints, à cause de la consistance de ces corps et de l'aspect désagréable qu'ils présentent.

96. *A la mer* on emploie le *coal-tar* pour conserver la coque des bateaux à vapeur en fer ; mais ce moyen ne fait que retarder l'oxidation, il ne l'empêche pas (1). C'est dans ce cas surtout et dans celui qui précède que l'étamage au zinc serait d'un grand service. Mais, comme je l'ai dit précédemment, l'emploi de ce procédé est subordonné à la découverte du moyen de l'appliquer en grand avec économie.

97. La *gutta percha*, dont on s'est servi récemment dans les télégraphes électriques comme d'une substance isolante, jouit d'une imperméabilité à l'eau et à l'air qui pourrait bien étendre son emploi à la conservation du fer, dans certaines circonstances, comme dans le cas des ponts suspendus en fil de fer, par exemple ; je ne pense pas que cette substance ait jamais reçu une pareille application, et je ne puis dire si elle offrirait des avantages sous le rapport économique.

Des effets de la température sur le fer et la fonte.

98. La température la plus haute à laquelle le fer peut être élevé accidentellement est celle qui est nécessaire pour le souder. Sous l'influence de cette température et entre les mains d'un ouvrier peu exercé, il arrive souvent qu'une barre de fer est brûlée. Sa résistance est alors notablement diminuée. Si l'on surmonte cette première difficulté, on ne peut jamais être bien certain que la soudure soit complète dans toute la section

(1) M. Fairbairn est d'avis qu'un moyen de diminuer encore la rapidité de l'oxidation des navires serait de les faire remonter dans l'eau douce de temps en temps.

de rapprochement des barres à réunir. De sorte que l'on a tout d'abord quelque raison de craindre qu'une barre soudée ne présente pas une résistance égale dans toutes ses parties. Il y a bien quelques expériences qui tendraient à montrer que l'on peut donner à une barre ou à un fil, dans la soudure, une résistance aussi grande que celle qu'elle présente partout ailleurs. Mais il est évident que ce sont là des résultats exceptionnels obtenus par des forgerons habiles qu'on ne peut se flatter de retrouver d'une manière normale en pratique. Ce qui le prouve d'ailleurs, ce sont les expériences multipliées qui furent faites en Prusse à l'occasion d'un pont suspendu en chaînes à construire sur la Ruhr près de Mulheim. Il résulte en effet de ces expériences qu'il faut toujours s'attendre, dans les pièces soudées, à une perte de résistance d'environ 30 p. 100.

Ce résultat est d'accord avec l'habitude actuelle des praticiens anglais, qui, dans leurs nouvelles constructions, évitent avec soin toutes les pièces de forge. Ils n'ont pris ce parti qu'après avoir reconnu qu'un système de pièces soudées était non seulement défectueux, mais dispendieux. Aussi voit-on aujourd'hui en Angleterre des ponts et des combles d'une grande portée dans lesquels il n'entre pas une seule pièce de fer soudée.

99. Le fer en barres laminé ne paraît rien perdre de sa résistance par le recuit, mais il acquiert une élasticité plus parfaite.

Soumis à la même opération, le fil de fer perdrait, d'après les expériences de M. Vicat, la moitié de sa résistance, et prendrait sous les mêmes charges des allongements plus grands d'un cinquième environ.

100. Quant à l'effet des autres températures auxquelles le fer et la fonte sont plus communément exposés, voici les renseignements que j'ai pu recueillir :

On trouve dans les Comptes-rendus de l'Académie des sciences (1850) ce fait assez curieux, résultant d'expériences de M. Johnson : que le fer offre une résistance plus grande à la température de la glace fondante et à 160° Réaumur qu'à la température intermédiaire de 80° R.

M. Poncelet rapporte dans sa *Mécanique industrielle* que Tredgold, en opérant sur une barre de fer à 67° Réaumur, a trouvé une diminution de ténacité de 1/20. — Il ajoute, pour les températures plus élevées, que, d'après une expérience de M. Poirier de Saint-Brice, la ténacité d'une barre de fer chauffée au rouge (450° R. ou 562° C.) serait réduite de 43ᵏ.45 par mill. quarré à 7ᵏ.80, c'est-à-dire à environ 0.16 de sa valeur à la température ordinaire. Suivant M. Poncelet, ce résultat se trouverait confirmé par une expérience de M. Prechtel (tome 3 de son *Encyclopédie technologique*).

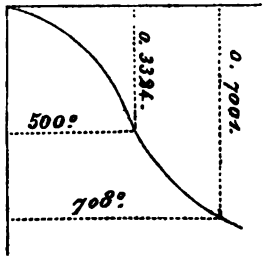
101. Ces faits isolés jettent peu de jour sur la question et seraient de peu d'utilité pour estimer la résistance des fers aux températures assez variées auxquelles ils peuvent être soumis dans l'industrie. Aussi, pour terminer cet article, emprunterai-je à l'ouvrage de MM. E. Flachat, Barrault et Petiet, quelques uns des nombreux résultats obtenus en Amérique par une commission chargée de faire un rapport à l'Institut de Franklin sur la résistance des matériaux employés dans les chaudières à vapeur.

Extrait du tableau des expériences de la Commission.

Numéros des expériences.	Températures observées en 0° centigrades.	Perte de résistance en fonction du maximum de ténacité à froid.
1	271°	0,0738
6	350	0,1155
10	408	0,1589
12	440	0,2010
13	500	0,3324
15	554	0,4478
16	599	0,5514
19	642	0,6352
22	708	0,7001

Les résultats de ce tableau ne paraissent pas d'accord avec ceux qui précèdent. Mais on leur doit naturellement plus de crédit qu'à des expériences isolées, qui peuvent, après tout, n'être que des anomalies.

Pour rendre plus sensible la loi suivant laquelle s'effectuait la perte de ténacité, on a tracé une courbe dans laquelle les températures étaient portées en abscisses et les pertes de résistance en ordonnées; et l'on a trouvé qu'elle avait la forme représentée dans le croquis ci-contre. Il s'ensuivrait qu'à partir de 500° les pertes croîtraient dans une proportion plus faible que dans les températures moyennes. Les auteurs de l'ouvrage précité font remarquer que l'expérience a aussi fait reconnaître que les dilatations que le fer éprouve sous l'influence de la chaleur présentent un changement analogue vers 500°, et que les allongements sont aussi moindres entre 500° et 1500° qu'entre 25° et 525. Ces résultats viennent confirmer les précédents, car il est naturel de supposer que le fer présente d'autant moins de résistance à la traction qu'il est plus dilaté par la chaleur.



102. Aucune observation n'a mis à même de déterminer si la résistance du fer et de la fonte éprouvait quelques variations à des températures comprises dans les limites de celles que subit l'atmosphère en France. Il est probable que ces variations existent, mais qu'elles sont négligeables. Mais on s'accorde à reconnaître que la gelée rend ces métaux plus susceptibles de se rompre sous l'influence d'actions dynamiques telles que les chocs.

103. Il me reste maintenant à dire quelques mots sur l'effet de la dilatation des métaux dans les constructions et à rechercher s'il est tel que l'on doive toujours s'en préoccuper et y pourvoir.

Pour cela, il convient d'abord que je rappelle qu'entre 0 et 100° on peut admettre que la dilatation par mètre et par degré centigrade est :

Pour la fonte, de . . . . . 0m.0000111.

Pour le fer, de . . . . . 0m.0000122.

Or, si l'on suppose, ce qui est généralement le cas, que les

fontes d'un pont sont mises en place au commencement ou à la fin d'une campagne, c'est-à-dire à une époque ou la température moyenne est d'environ 10°, et si, d'autre part, l'on admet qu'au cœur de l'été la température du métal peut s'élever à 40°, un mètre linéaire de fonte, s'il n'éprouve aucun obstacle, s'allongera d'une quantité exprimée par la formule

$$a = 30^{\circ} \times 0^{m},0000111 = 0^{m},000333.$$

Si, au contraire, les dispositions sont prises pour empêcher cet allongement, c'est absolument comme si l'on comprimait la fonte d'une quantité égale à celle que l'on vient de trouver, et par conséquent comme si on la soumettait à un surcroît de pression donné par la formule (9). Introduisant dans cette formule la longueur de 1 mètre et l'allongement ci-dessus exprimés en centimètres, on a :

$$P = 909\,218\frac{0,0333}{100} - 40\,598\,628\left(\frac{0,0333}{100}\right)^{2} = 298 \text{ kilogr.},$$

c'est-à-dire le 20e de la charge de rupture d'une fonte ordinaire, ce qui est tout à fait insignifiant. C'est donc avec raison que sir John Rennie, dans son pont de South-Wark à Londres, a adopté une forme de tympans rigide et un assemblage sans jeu avec les maçonneries, sans avoir égard à la dilatation.

En hiver, la température peut descendre à —20°; on peut se proposer de rechercher si des poutres en fonte dont une partie résiste à la traction doivent se contracter librement. Mais on ne connaît pas les quantités dont ce métal se contracte entre 0° et —20°. Si l'on admet que le taux soit le même que pour la dilatation, de +10° à —20° un mètre de longueur de fonte aura diminué de 0.000 333, et le surcroît d'effort de traction auquel le métal serait soumis si l'on s'opposait à cet effet serait (formule n° 1) :

$$P = 969\,568\frac{0,0333}{100} - 188\,500\,268\left(\frac{0,0333}{100}\right)^{2} = 303 \text{ kil.},$$

c'est-à-dire environ le tiers de la résistance à la rupture. Et dans ce cas il importerait évidemment de laisser la contraction se faire en toute liberté.

Pour une différence de température de 30°, le fer s'allongerait de

$$a = 30 \times 0{,}0000122 = 0^{m}.000366.$$

Et en s'opposant à la dilatation, on le soumettrait à un surcroît de pression exprimé par (formule n° 11) :

$$P = \frac{1621\,231 \times 0{,}0366}{100} = 592 \text{ kil.}$$

Le fer employé étant supposé offrir une résistance à la compression de 4,000 kil. par cent. quarré, et travailler au sixième de sa résistance maximum, le surcroît de pression dû à la dilatation serait encore d'un sixième, ce qui porterait à environ un tiers de la charge de rupture le travail entier du métal.

On arriverait à un résultat un peu plus fort pour une barre de fer qui ne serait pas libre de se contracter entre + 10° et — 20°. Il faut en conclure que, pour le fer, il y a lieu de n'adopter que des dispositions qui permettent à la dilatation et à la contraction de s'effectuer librement. En agissant autrement on exposerait le métal à travailler au delà de la limite que l'expérience a indiquée comme ne devant pas être dépassée.

Appendice au Mémoire sur le fer et la fonte.

Tableau des résistances des diverses fontes du pays et des circonstances qui peuvent influer sur cette résistance.

1	Nom du département.	
2	Nom de l'usine.	
3	Nature du minerai.	
4	Nature du fondant.	
5	Espèce de combustible employé.	
6	Température de l'air injecté dans le haut-fourneau.	
7	Résistance à l'effort transversal d'un barreau en fonte de 1re fusion de 50 cent. de longueur entre les appuis, et de 3 cent. 1/2 de côté.	
8	Aspect de la cassure.	
9	Prix de la fonte moulée de 1re fusion prise à l'usine.	
10	Espèce de four dans lequel s'opère la 2e fusion.	
11	Temps écoulé entre la sortie de la fonte en fusion du four et le coulage dans le moule.	
12	Sable du moule (sable d'étuve ou sable vert).	
13	Résistance à l'effort transversal d'un barreau de 2e fusion de 50 cent. de longueur entre les appuis, et de 3 c. 1/2 de côté.	
14	Aspect de la cassure.	
15	Valeur de T déduite de la formule $\frac{1}{4}PL = \frac{1}{3}TEH^2$	
16	Valeur de C dans l'hypothèse où le rapport de T à C est 1 : 8,80.	
17	Prix de la fonte moulée de 2e fusion prise à l'usine.	
18	Produit du prix par la résistance de la fonte à la traction.	
	Observations.	Noter à quelle partie de la longueur la rupture s'effectue, etc.

En donnant ce tableau, je n'ai pas la prétention d'indiquer un modèle à suivre à la lettre; mais le sens dans lequel il doit être fait. Beaucoup d'ingénieurs plus experts que moi en cette matière pourront sans doute le modifier avantageusement. Les têtes de colonnes s'expliquent d'elles-mêmes. Aussi me bornerai-je à faire au sujet de ce tableau deux observations. C'est que d'abord il est indispensable que les échantillons éprouvés aient deux cent. 1/2 de côté : car sans cela les résultats obtenus ne seraient pas comparables à ceux fournis par les Anglais, et ne pourraient entrer ni dans leurs formules ni dans celles qui font l'objet de ce mémoire. En outre, les barreaux doivent être parfaitement calibrés, car la plus petite différence dans la valeur de H (un quart de millimètre, par exemple) peut en donner une grande dans les résultats.

Enfin, je ferai observer que les épreuves que j'indique comme devant être faites de préférence sont celles par effort transversal, parce que ce sont les plus faciles, les moins dispendieuses, et celles dont on peut tirer immédiatement le meilleur parti. En effet, les épreuves par traction et par compression exigent des appareils solides et coûteux, et des poids de rupture considérables : ainsi, qu'il s'agisse, par exemple, de rompre par traction une barre quarrée de fonte de 60 cent. de longueur et de 2 centim. 1/2 d'épaisseur, cette barre pourra exiger un effort de 11 à 12,000 kilogrammes. Les épreuves par compression demanderaient des charges plus fortes encore; tandis qu'avec deux appuis faciles à obtenir éloignés de 50 cent., pour rompre cette barre par effort transversal il suffira d'une charge de 750 kil. au maximum. D'ailleurs les expériences par traction et par compression n'avaient réellement d'intérêt que lorsqu'on ne connaissait qu'imparfaitement le rapport des résistances à la traction et à la compression d'une même fonte, que l'on ignorait la modification à faire subir à la formule de la résistance à l'effort transversal pour la mettre d'accord avec la résistance réelle de la fonte à la traction (§ 12) ainsi que d'autres particularités plus ou moins importantes

(§ 6, 7, 11, 31, etc.) de la résistance de la fonte. Mais aujourd'hui que ces divers points ont été éclaircis par les expériences de M. Hodgkinson, et que l'on peut, avec une approximation suffisante et au moyen de la formule (23), déduire d'expériences par effort transversal les autres résistances du fer et de la fonte, les expériences faites en vue de les déterminer directement seraient à peu près sans objet.

Un tableau semblable au précédent devrait être dressé pour le fer en barres, en modifiant naturellement les têtes de colonnes suivant les circonstances particulières de la réduction de la fonte en fer malléable.

Au moyen de ces tableaux on arriverait bientôt à connaître, outre la qualité des fontes et fers du pays, les circonstances trop peu connues ou mal appréciées qui la font varier dans des limites si étendues, et l'on pourrait seulement alors trouver les moyens de remédier au mal. Jusqu'ici il me paraît, sauf meilleur avis, que l'on ne s'est guère occupé que de rechercher les meilleurs procédés pour produire la plus grande quantité de métal au meilleur marché possible, sans se préoccuper beaucoup de la question de savoir en quoi les nouvelles méthodes mécaniques ou chimiques pouvaient affecter la qualité des produits. Or on comprendra de reste qu'il ne sert à rien de produire le double de fonte avec la même dépense, si par les moyens mis en œuvre la ténacité du métal est réduite de moitié. Qui s'est occupé, par exemple, de rechercher l'influence sur la résistance du métal de la suppression du grillage préalable du minerai? Il n'y a cependant rien d'impossible à ce que cette modification apportée dans l'ancienne méthode ait amoindri la qualité des produits.

Peut-on affirmer que l'emploi de l'air chaud dans les hauts-fourneaux soit un véritable progrès dans l'art métallurgique? Il est certain qu'il y a économie à en faire usage, soit que l'on traite un bon minerai, soit que l'on y adjoigne, comme en Écosse, une grande quantité de résidus ou de minerais qui étaient auparavant intraitables. Mais, dans ce dernier cas, il

est prouvé que la fonte obtenue est d'une qualité inférieure. Dans le premier, il paraîtrait, suivant quelques ingénieurs, que l'air chaud, par suite de la plus haute température à laquelle il élève les hauts-fourneaux, permettrait la combinaison du métal avec une plus grande quantité de silice et de carbone; d'où il résulterait sinon toujours une qualité inférieure, du moins une plus grande inégalité dans la résistance des produits.

La mesure que je propose fournirait les moyens de résoudre ces diverses questions, ou mettrait au moins sur la voie d'une solution. On peut ajouter qu'en l'adoptant, les ingénieurs connaîtraient mieux les propriétés des métaux et le parti qu'ils pourraient tirer, suivant le cas, de ceux de telle ou telle localité; ce qui contribuerait sans doute à étendre de plus en plus l'emploi du fer et de la fonte. D'ailleurs, on pourrait s'attendre encore à ce qu'elle créât une sorte d'émulation entre les maîtres de forges pour l'obtention de meilleurs produits; et l'état pourrait intervenir ici utilement en stimulant cette émulation par des récompenses.

Je termine cet appendice par une dernière observation.

Si les maîtres de forges français entendaient bien leurs intérêts, il est une mesure bien simple qu'ils devraient prendre de concert, et qui aurait pour effet certain, à mon avis, d'accroître en peu de temps l'usage du fer et de la fonte. Il suffirait qu'ils fissent publier à leurs frais un annuaire contenant, outre les résultats ci-dessus d'expériences obtenus par les ingénieurs des mines, la nature, la forme indiquée par des croquis, les dimensions en longueur, largeur et épaisseur, de leurs produits habituels en fer ou en fonte, avec les poids et prix moyens de vente : car il doit arriver quelquefois qu'un ingénieur emploie le bois pour un comble, un pont ou toute autre construction, parce que cette matière se trouve partout et que l'on en connaît généralement le cours; tandis qu'il aurait pu peut-être y substituer le fer ou la fonte avec avantage, et qu'il l'eût fait s'il avait été mieux renseigné sur ces métaux.

En Angleterre de pareilles choses existent. Il y a plus : des

chefs d'usine mettent fréquemment à la disposition d'expérimentateurs connus, comme M. Hodgkinson, un nombre considérable d'échantillons de leurs produits des formes et dimensions les plus variées, parce qu'ils calculent, et avec raison, que les résultats d'expériences seront mis sous les yeux des hommes spéciaux, et qu'ils arriveront ainsi à faire mieux connaître leur établissement, à étendre leurs relations et à augmenter le chiffre de leurs affaires. Je suis persuadé que plus d'une usine a dû un accroissement notable dans sa prospérité aux expériences de M. Hodgkinson; et il est permis de croire aussi que les moyens de publicité dont il vient d'être question, et qui caractérisent si bien l'esprit éminemment industriel et mercantile de nos voisins, n'ont pas été sans influence sur l'extension rapide de l'emploi du fer et de la fonte en Angleterre.

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ DES INGENIEURS CIVILS

(Octobre, Novembre et Décembre 1851)

N° 15

Pendant ce trimestre, on a traité les questions suivantes :

1° Drainage employé pour assainir les voies des chemins de fer (V. le résumé des séances, p. 207) ;

2° Construction des wagons à marchandises (V. le résumé des séances, p. 208) ;

3° Discussion sur la désincrustation des chaudières des machines à vapeur (V. le résumé des séances, p. 214) ;

4° Communications sur l'Exposition universelle de Londres, relatives aux moteurs hydrauliques, turbines, pompes rotatives, tuyaux de distribution d'eau du Palais de Cristal, presses hydrauliques, machines à moissonner, et appareils pour chemins de fer (V. le résumé des séances, p. 219 à 253) ;

5° Discussion sur les expériences faites au calorifère de l'église Saint-Roch (V. le résumé des séances, p. 255).

Dans la séance du 26 décembre, le Trésorier a donné lecture de son rapport, qui expose la situation financière de la Société.

Dans cette séance, la Société a procédé aux élections des membres du Bureau et du Comité pour l'année suivante. Le résultat du scrutin a donné la composition suivante :

Membres du Bureau.

Président :

M. E. Flachat, ✻ rue de Londres, 51.

Vice-présidents :

MM. Emile Vuignier ✻, rue du Faubourg-Saint-Denis, 146.
Charles Callon, rue des Vosges, 13.
J. Petiet ✻✻, rue Lafayette, 34.
C. Poloncbau ✻, boulevart de l'Hôpital, 4.

Secrétaires :

MM. Adolphe Bellier, rue Saint-Honoré, 83.
Léon Yvert, rue Bleue, 5.
Henri Mathieu, rue Rougemont, 10.
E. Gerber, rue Richer, 10.

Trésorier :

M. G. Loustau, rue Saint-Quentin, 23.

Membres du Comité.

MM. Faure, boulevart Saint-Martin, 55.
Cavé ✻, rue du Faubourg-Saint-Denis, 214.
Yvon Villarceau, rue Cassini, 14.
A. Salvetat, à Sèvres (Manufacture nationale).
Al. Nozo, place du Château-Rouge, 2, à Montmartre.
Decousée, rue Chabrol, 35.
Houel ✻, quai de Billy, 48.
Bergeron, rue de Lille, 79.
P. Seguin, rue Louis-le-Grand, 3.
Knab, rue de Seine, 72.
Stéphane Mony ✻, rue d'Alger, 9.
Léonce Thomas ✻, rue des Beaux-Arts, 2.
Victor Bois, place du Havre, 14.
La Salle, rue Saint-Georges, 58.
Pepin-Lehalleur ✻, rue de la Victoire, 14.
A. Barrault, rue de Clichy, 63.
M. Alcan, rue d'Enghien, 28.
Calla ✻, rue Lafayette, 11.

Evrard, rue Popincourt, 71.
Chobrzynski, rue du Nord, 11.

Pendant ce trimestre, la Société a reçu :

1° De M. Ch. Callon, un compte-rendu fait en 1851 aux actionnaires du chemin de fer d'Anvers à Gand;

2° De M. Debonnefoy, une note sur l'emploi des moises dans la construction des wagons;

3° De M. Lefrançois, une note sur la recherche de la longueur de la courbe de l'ellipse;

4° De M. Pottier (Ferdinand), un mémoire sur les expériences faites au calorifère de l'église Saint-Roch;

5° De M. Love, un mémoire sur la résistance du fer et de la fonte, basé principalement sur les recherches expérimentales les plus récentes faites en Angleterre;

6° De M. Bois, une note sur la construction du Palais de cristal pour l'Exposition universelle de Londres.

M. Buffet, ministre de l'agriculture et du commerce, a envoyé à la Société, à titre de sympathie et d'encouragement, les ouvrages suivants :

1° Rapport du jury central de l'Exposition de 1834;
2° id. id. id. 1839;
3° id. id. id. 1844;

4° Procès-verbaux des conseils généraux de l'agriculture, des manufactures et du commerce en 1841, 1842, 1845 et 1846;

5° Cours d'agriculture (de M. Gasparin);

6° La Maison rustique du XIX° siècle;

7° Les institutions de crédit foncier en Allemagne (par M. Royer);

8° L'agriculture allemande, par le même;

9° Rapport sur le crédit foncier (par Josseau);

10° Cours de chimie industrielle (de M. Payen);

11° Rapports sur les colonies agricoles (par MM. Roman et de Lurieu);

12° Agriculture française ;

13° Du cheval en France (par Ch. de Boigne) ;

14° De l'élève du cheval en Bretagne (par Ephrem Houel) ;

15° Stud-Book français ;

16° Statistique de la France en 12 volumes.

Pendant ce trimestre, on a admis comme membre sociétaire :

M. Henri Marès, présenté par MM. L. Yvert, Quetil et de Montcarville.

MÉMOIRE N° XXVIII.

Causes des inondations souterraines qui se manifestent dans les quartiers nord de Paris dans certaines circonstances déterminées,

Par M. E. VUIGNER.

Les inondations qui ont eu lieu dans certains quartiers de Paris, par suite des pluies torrentielles du mois d'août dernier, ont appelé naturellement l'attention des ingénieurs sur les égouts de la capitale, et il a été unanimement reconnu que ces inondations de surface avaient eu pour principale cause le système suivi pour l'établissement des égouts.

Nous avons pensé que c'était l'occasion d'entretenir la Société des ingénieurs civils d'un autre phénomène qui se manifeste dans les quartiers nord, et auquel le système des égouts n'est pas non plus étranger. Il s'agit d'inondations souterraines qui ont lieu dans certaines circonstances déterminées et qu'on peut aujourd'hui annoncer avec autant de certitude qu'on règle la marche des éclipses et des autres phénomènes célestes.

Quelques détails préliminaires sont indispensables pour bien faire comprendre et les causes et les effets de ces inondations souterraines.

Le bassin dans lequel la ville de Paris est construite est couronné au nord par les hauteurs de Montmartre, de Belleville, de Ménilmontant et de Chaumont, tandis qu'au sud il se rattache aux collines de Montrouge, de Vanvres et de Meudon, et la Seine, qui coule du sud-est au nord-ouest, sépare la ville en deux parties à peu près égales.

Sur la rive gauche de la Seine le sol est assez accidenté; il est composé d'un calcaire très dense, et l'on n'a pas remarqué

jusqu'ici d'inondations souterraines dans les quartiers de cette rive.

Sur la rive droite, il existe une partie basse assez large, qui s'étend jusqu'au-delà du boulevard intérieur et vient se rattacher au pied des collines ci-dessus indiquées.

Le sol de cette plaine, exhaussé de quelques pieds seulement au-dessus du niveau de la Seine, est formé d'une couche de terre végétale recouvrant un terrain d'alluvions composé de graviers et de sable incohérent, qui laisse filtrer les eaux dans tous les sens. Ce terrain d'atterrissement, dont l'épaisseur est souvent de plusieurs mètres, repose lui-même soit sur une couche de glaise imperméable à l'eau, soit sur des marnes très compactes qui forment la base des pierres à plâtre de Montmartre et de Belleville.

Cette plaine n'était pas continue entre la Seine et le pied des collines; elle était traversée dans toute sa longueur par une dépression assez prononcée, parallèle au cours de la Seine, dans laquelle coulait le petit ruisseau connu sous le nom de *ruisseau de Ménilmontant*.

Antérieurement aux premiers établissements qui s'établirent sur la rive septentrionale de la Seine, et même au commencement du siècle dernier, ce ruisseau, creusé de près de deux mètres en contrebas du sol naturel, recevait toutes les eaux de surface de la vallée et celles qui descendaient des collines qui l'entourent; il portait toutes ces eaux de l'est au sud-ouest dans la Seine, au-delà de l'emplacement actuel de la Savonnerie.

Tous les marais du Temple, Saint-Martin, Saint-Denis et Saint-Honoré, au milieu desquels coulait ce ruisseau, étaient rarement inondés; ils se trouvaient naturellement desséchés, soit par l'effet de la perméabilité des terres formant les berges du ruisseau, soit au moyen des fossés qu'on y faisait aboutir au besoin.

Il n'en fut pas ainsi lorsqu'à ce simple fossé on eut substitué le grand égout, aqueduc voûté en saillie de plusieurs mètres

au-dessus du terrain, et surtout lorsque les nouvelles rues dont ces marais furent entrecoupés plus tard ajoutèrent d'autres obstacles à l'écoulement des eaux pluviales. Ces eaux, lorsqu'elles tombèrent avec assez d'abondance et de continuité, furent arrêtées par toutes ces digues; elles durent alors rester stagnantes, pour se perdre ensuite par évaporation ou par infiltration.

Les marais longeant le grand égout dont le sol ne fut pas exhaussé par des décharges publiques restèrent naturellement exposés à des submersions fréquentes. Ils furent remblayés plus tard, mais ces remblais n'ont pu influer sur la nature du terrain primitif, et les eaux qui descendent des collines voisines, au lieu de se montrer à la surface du sol, sont venues plus lentement, en suivant les couches imperméables qui les arrêtent, exhausser la nappe souterraine par laquelle les puits sont entretenus, et submerger les caves formant des cavités sur leur passage.

On termina en 1740 les travaux de maçonnerie du grand égout (planche 20, fig. 1), qui, comme on le sait, part de la rue des Filles-du-Calvaire, traverse la rue de Lancry, les faubourgs Saint-Martin, Saint-Denis et Poissonnière, suit les rues Neuve-Saint-Jean, des Petites-Ecuries, Richer, de Provence, Saint-Nicolas, puis se jette dans la Seine à l'extrémité des Champs-Elysées, au droit du quai de Billy; et dans le courant de cette même année, on observa la première inondation des marais et des caves des quartiers nord de Paris.

Les propriétaires, attribuant cette inondation à la mauvaise construction des maçonneries, se plaignirent à l'autorité municipale, en indiquant que le grand égout perdait les eaux qu'il devait conduire à la Seine. MM. Bouache et Bonamy furent chargés, comme membres de l'Académie, d'étudier cette question; ils constatèrent que la surface des eaux d'inondation était en contrehaut de la surface des eaux dans le grand égout, et ils reconnurent que l'invasion des eaux dans les caves n'était

due qu'à un exhaussement anormal des nappes d'eau souterraines déterminé par des pluies abondantes.

En 1788, une seconde inondation, plus forte que celle de 1740 se manifesta de nouveau dans les mêmes quartiers; les plaintes se renouvelèrent, et on l'attribua cette fois à des infiltrations existantes dans les grands réservoirs que l'on avait établis à Chaillot. Un ingénieur en chef des ponts et chaussées, M. Perronnet, adressa sur cette affaire un rapport spécial à l'administration supérieure; il y établit que les bassins de Chaillot étaient étanches, que l'inondation s'était également manifestée dans un grand nombre de rues en dehors de l'influence de ces bassins, et qu'elle s'était même produite dans des campagnes voisines de Paris, notamment sur les hauteurs de Belleville et de Montfermeil. Il conclut en attribuant cet accident à des pluies continuelles, dont le produit avait augmenté les nappes inférieures.

Une troisième inondation eut lieu en 1802; mais, comme on ne pouvait la rattacher à aucune circonstance extraordinaire, elle n'excita que des réclamations sans importance.

Il n'en fut pas ainsi en 1818. Toutes les caves des quartiers nord furent envahies par les eaux souterraines; les marais situés le long de la rue Grange-aux-Belles, entre les faubourgs du Temple et Saint-Martin, furent inondés depuis le commencement de mars jusqu'à la fin de juin, et les eaux s'exhaussèrent assez dans cette localité pour qu'on pût y circuler en bateau.

On venait de construire le bassin de la Villette, il était rempli d'eau, et les propriétaires victimes de l'inondation ne manquèrent pas de l'attribuer aux déperditions de ce bassin.

La constitution géologique du sol sur lequel est établi le bassin de la Villette ne permettait pas d'admettre qu'il fût la cause de l'inondation générale qui affectait encore comme en 1788 et en 1802 les campagnes voisines de Paris.

M. le préfet de la Seine fit ouvrir des tranchées à travers la

rue des Marais, il fit percer le mur septentrional du grand égout, pour donner aux eaux d'inondation la possibilité de s'écouler comme anciennement, en suivant la pente naturelle du terrain. La nappe d'eau s'abaissa bientôt progressivement, et les caves du quartier nord furent de nouveau asséchées.

M. Girard, membre de l'Académie des sciences et ingénieur en chef du canal de l'Ourcq, étudia avec beaucoup de soin les causes de ces inondations successives, et il lut à l'Académie, le 15 juin 1818, un mémoire fort intéressant, dans lequel il établit que « toutes les fois que la hauteur d'eau tombée dans l'espace de deux années consécutives se sera élevée au dessus » de 1m.20, et que le nombre des jours de pluie aura été dans » le même intervalle de plus de 320, les quartiers de Paris situés sur la rive droite de la Seine seront exposés pour l'année suivante à une inondation, qui commencera même quelquefois dans le courant de la deuxième année pluvieuse, et » qui doit être attribuée à l'effet des obstacles qu'on a successivement opposés au libre écoulement des eaux pluviales dans » ce quartier, et surtout à l'élévation des murs du grand égout. »

M. Girard est arrivé à cette conclusion en comparant l'histoire météorologique des années qui avaient précédé les premières inondations générales, et notamment celle des années 1786, 1787, 1816 et 1817. La hauteur d'eau de pluie en 1786 et en 1787 avait été de 1m.24; et elle avait été de 1m.22 pendant les années 1816 et 1817.

Le nombre total des jours de pluie en 1786 et en 1787 fut de 324, et il avait été de 325 pendant les années 1816 et 1817.

Les inondations souterraines qui ont eu lieu depuis lors dans les quartiers nord de Paris sont venues confirmer les prévisions de M. Girard.

Ainsi en 1826, 1828, 1830, 1832, les caves ont été généralement inondées dans les quartiers des anciens marais, et pendant les années précédentes le nombre des jours de pluie avait dépassé 320, de même que la hauteur d'eau tombée s'était élevée au chiffre de 1m.20.

En 1838, l'inondation fut beaucoup plus considérable, mais aussi pendant les années 1836 et 1837 le nombre des jours de pluie avait été de 331, et la hauteur d'eau tombée de 1^{m}.34 ; les eaux des sources aux environs de Paris avaient presque décuplé de volume au mois de mai, correspondant à l'inondation. Les caves de Montfermeil et de Belleville, comme toutes celles des villages situés sur le faîte séparatif des vallées de la Marne et de la Seine étaient toutes inondées à la même époque, et il en était de même sur le penchant des collines de Chaumont, de Ménilmontant, de Belleville et de Montmartre.

Ces inondations, qui se manifestèrent aussi au printemps et pendant l'été de 1838 dans les quartiers nord de Paris, ayant donné naissance à un grand nombre de réclamations contre l'administration de la ville, M. le Préfet de la Seine crut devoir charger une commission, composée de MM. Arago, Elie de Beaumont, Emery et Dufrénoy, de rechercher les causes de cet accident.

Cette commission démontra de nouveau jusqu'à l'évidence que l'inondation souterraine était due aux pluies continues de 1836 et 1837, et qu'il n'existait aucun moyen d'éviter le retour de ces inondations souterraines, car les travaux qu'il faudrait exécuter pour empêcher l'irruption des eaux intercepteraient en même temps la couche aquifère qui alimente les puits de la capitale.

En 1845 et surtout en 1846 l'inondation dépassa les limites des inondations précédentes, parce que les circonstances météorologiques furent plus désavantageuses encore qu'en 1836 et 1837.

En 1843 et 1844, en effet, le nombre des jours de pluie avait été de 332, et il dépassa 330 en 1844 et en 1845 ; la quantité d'eau tombée avait été de 1,41 pour 1843 et 1844, et de 1,356 pour 1844 et 1845 : 1846 avait donc été précédé par trois années extrêmement pluvieuses.

Nous avons vérifié nous-même tous ces faits en compulsant les registres de l'Observatoire de Paris, où l'on tient note

exacte de tous les jours de pluie et de la quantité d'eau tombée journellement dans un bassin de marbre disposé à cette effet.

Il est donc bien certain maintenant, comme l'a indiqué M. Girard, que toutes les fois que la hauteur d'eau tombée dans deux années consécutives se sera élevée au dessus de $1^{m},20$, et que le nombre des jours de pluie aura été dans le même laps de temps de plus de 320, les quartiers du nord de Paris seront exposés pour l'année suivante à des inondations souterraines.

MM. les ingénieurs qui ont à construire des établissements dans ces quartiers doivent donc se rendre un compte exacte de l'amplitude de ces inondations, et prendre les dispositions nécessaires pour mettre les caves et les cendriers des machines à vapeur de ces établissements à l'abri de l'irruption de ces eaux souterraines.

Il n'y a d'autre parti à prendre, à cet effet, que de se mettre au dessus de ces inondations, ou d'envelopper les caves et les cendriers des machines à vapeur de chemises imperméables en beton, si l'on a besoin de se tenir en contre-bas.

MÉMOIRE N° XXIX.

Emploi des moises dans la construction des wagons,

Par M. DEBONNEFOY.

Lors de l'établissement des premiers chemins de fer, on a dû s'occuper de l'étude du matériel roulant, voitures et wagons. Des types ont été produits, les lignes qui se sont établies depuis ont copié ces modèles en y apportant diverses modifications qui devaient donner aux voyageurs un confortable que la vulgarisation de ce mode de transport rendait nécessaire; l'on a même été jusqu'à mettre un certain luxe dans ces constructions.

Mais jusqu'ici ces travaux n'ont pas été l'objet d'études suivies au point de vue des meilleures conditions dans lesquelles il est possible de se placer sous plusieurs rapports. Le matériel destiné au transport des marchandises n'a subi depuis l'origine que peu d'améliorations. L'on s'est occupé cependant de détails importants : l'on a modifié les dimensions des essieux; les roues ont été l'objet de nombreux essais ; les ressorts, dans ces derniers temps, ont été étudiés d'une manière remarquable par l'un de nos collègues, M. La Salle. Mais la charpente, dont la construction est l'âme du système, est restée en arrière, et l'on a continué à réunir des pièces de bois par tenons et mortaises, à les consolider au moyen de harpons, d'équerres et de boulons, se proposant d'arriver à une forme extérieure donnée pour la caisse et le train, sans coordonner autant qu'il est peut-être possible de le faire tous ces détails pour en former un ensemble satisfaisant au point de vue de l'art, au lieu d'appliquer à la construction des wagons les principes admis depuis un certain nombre d'années dans celle des charpentes en général.

Il est facile de comprendre cependant, et l'on admettra sans

doute que, si, dans des travaux qui ne sont soumis qu'à des efforts réguliers et constants, il est bon d'étudier les combinaisons des pièces qui par leur disposition même, sans le secours de ferrures nombreuses, difficiles et d'un prix élevé, puissent offrir sous le moindre poids avec la moindre dépense de main-d'œuvre des garanties de solidité suffisantes, il est bien plus important encore de se préoccuper de cette question en présence de l'étude d'un matériel de plusieurs milliers de véhicules, qui, soumis constamment à des mouvements dont le résultat inévitable est d'apporter dans l'ensemble une très sérieuse perturbation, doit en outre présenter le rapport le plus grand possible entre le poids du véhicule lui-même et celui qu'il peut supporter.

On pense généralement que pour donner aux wagons une solidité suffisante en leur permettant de résister aux chocs plus ou moins intenses auxquels ils sont exposés, il est nécessaire de relier les pièces qui les composent au moyen de ferrures diverses.

Ce système cependant offre de graves inconvénients; ainsi :

Les équerres simples, quelle que soit leur forme, sont toujours des pièces lourdes et coûteuses; placées à l'extérieur, elles favorisent l'action de l'eau qui séjourne entre elles et les bois, qu'elle pourrit. Elles sont fixées à boulons ou à vis; dans les deux cas, le bois en séchant, et il est impossible d'admettre que cet effet puisse être évité, laisse un jeu de un ou plusieurs millimètres, et dès lors le ferrement n'a plus aucune action. Les équerres doubles sont encore bien plus vicieuses, car il est impossible de ferrer trois pièces de bois par une pièce quelconque sans qu'après deux mois de marche l'assemblage soit à refaire.

Dans ces conditions, si les bois n'ont pas été disposés d'après certaines règles de charpente propres à s'opposer à la dislocation de l'ensemble, le wagon est à réparer, et ce travail offre des difficultés sérieuses, car il faut percer de nouveaux trous dans les bois, resserrer les assemblages et replacer les ferrures.

L'on a pensé qu'il serait possible, en abandonnant ces idées, d'arriver à construire des wagons qui, tout en ne présentant pas ces inconvénients, auraient en outre l'avantage de s'opposer au mouvement des bois, qui se cintrent en tirant à cœur, et donnent, encore neufs, des flèches de 3, 4, 5 ou 6 centimètres sur la longueur d'un brancard de 6 mètres; l'on a pensé de plus qu'il serait intéressant de réduire autant que possible les assemblages à tenons et mortaises, qui affaiblissent les bois aux parties qui exigent la plus grande force et qui les font rapidement pourrir : effets que ne peut détruire cependant l'emploi des harpons, qui remplacent d'ailleurs avec avantage les ferrures, dont on faisait autrefois un si grand usage. Pour y arriver, l'on a cherché à combiner les différentes pièces qui doivent entrer dans la construction d'un wagon quelconque, de telle sorte que par cette disposition même le wagon puisse être livré au service sans qu'il soit besoin de recourir aux tenons ou aux ferrures d'assemblage, en contrariant l'action des bois de certaines pièces par la rigidité de l'ensemble et en les faisant concourir toutes au même but.

Un train de wagons doit réunir certaines conditions principales. Il doit d'abord ne pas se courber en longueur : la hauteur des tampons et la position des plaques de garde en dépendent. Les deux brancards doivent être parfaitement maintenus à distance; le rectangle qu'ils forment ne doit pas pouvoir se déformer, car alors les essieux, guidés par les plaques de garde, ne seraient pas perpendiculaires à l'axe de la voie. Enfin, et cette dernière observation est presque surabondante, il doit résister verticalement sur tous les points à la charge qu'il a à supporter. Il est rare de voir un wagon un peu long sans un cintre prononcé; les plaques de garde ont besoin d'être vérifiées et remises en place dans tout wagon qui a marché une année ; les assemblages de train sont généralement disloqués après peu de temps. Ce sont là des faits qu'il est malheureusement trop facile de constater ; de plus, et par suite même de cette disposition des assemblages, il n'est pas rare de voir les bois s'altérer en

ces points, alors que toutes les autres parties sont encore parfaitement saines.

Quant aux caisses, et nous parlons spécialement ici de celles des wagons à bestiaux ou à marchandises, bien qu'il soit possible d'appliquer ces principes à la construction des wagons à voyageurs, elles éprouvent par le fait même de leur hauteur des efforts très puissants qui tendent à les faire pivoter autour de l'une et de l'autre des faces extrêmes alternativement et qui ne tardent pas à les désassembler dans toutes leurs parties; une cheville ou une vis fixant un tenon dans sa mortaise qui ne la comprime plus lorsque le bois est sec est un obstacle presque nul à cette action.

Les bois ainsi coupés de distance en distance absorbent facilement l'eau qui les baigne et qui les réduit en peu de temps en poussière; car les revêtements généralement placés à l'intérieur et par alaises horizontales laissent exposés tous les assemblages.

Un brancard composé de deux pièces espacées de 0m.08 tenues à distance par d'autres pièces faisant office de tasseaux et présentant en total une hauteur de 0m.340 ne se ploiera pas aussi facilement qu'un morceau de bois de 0m.27; il résistera à une charge beaucoup plus forte sans aucun doute. Ce sont là les brancards que l'on a adoptés (planche 20, fig. 4, 5, 6, et planche 21, fig. 6, 7, 8, 9, 10 et 11); les pièces de bois qui séparent les deux pièces de chacun d'eux ne sont autre chose que les traverses qui tiennent les deux brancards à distance. Elles sont entaillées, ainsi que les brancards, de 1 à 2 centimètres, avec repos sur chaque face, pour les empêcher de se fendre.

Ces traverses, qui se trouvent moisées par les brancards, moisent elles-mêmes celui du bas et les croix de Saint-André au moyen de traverses semblables aux extrémités et en deux points intermédiaires; les deux brancards sont ainsi tenus à distance par quatre traverses doubles et trois traverses simples de plus faible dimension, qui supportent, avec les quatre autres, un plancher placé dans le sens de l'axe du wagon.

Il est difficile d'admettre que dans ces conditions l'écartement des brancards puisse changer, et le châssis ne peut se courber sans entraîner avec lui le plancher placé dans le sens de l'axe du wagon vissé sur 7 traverses au niveau de la partie supérieure des brancards, qu'il relie invariablement avec elles, formant un ensemble de pièces parfaitement solidaires, et donnant ainsi une très grande rigidité au système, tandis que dans les wagons construits jusqu'à ce jour les planchers posés en travers n'ont aucune action et n'entrent pour rien dans l'ensemble de la charpente; enfin, l'on n'a que des boulons d'assemblage; les croix de Saint-André même sont prises chacune aux extrémités et en deux points intermédiaires entre les traverses qui les moisent.

Des châssis ainsi construits à $7^{m},06$, tampons compris, et portés sur des essieux écartés seulement de $2^{m},700$, en raison des plaques tournantes, c'est-à-dire ayant à chaque extrémité un porte à faux de $2^{m},12$, n'ont pas fléchi, depuis près de 2 années, d'une quantité appréciable.

Le même principe a présidé à la construction des caisses. On a placé sur deux brancards de caisse, pris à tenons et mortaises dans les 7 traverses supérieures du train, des montants qui sont maintenus dans leur position verticale par des pièces légères de $0^{m}.04/0^{m}.07$, qui les moisent au milieu de leur hauteur et à leur sommet, en les réunissant tous les uns aux autres, sans affaiblir les bois qui composent cet ensemble. Des contrefiches prises entre ces moises soutiennent les montants contre les efforts de va et vient de la caisse, en les reportant sur la base des montants et sur les brancards de caisse.

Un faîtage en deux pièces moise, en les tenant à distance, les 2 montants du milieu de chacune des faces extrêmes et supporte les planches du toit placées suivant la pente.

Les parois sont formées d'alaises verticales réunies par des lames de zinc de $0^{m}.02$ et sont vissées sur les contrefiches, les brancards de caisse et les moises, en effleurant les montants à 5 millimètres près. Par cette disposition, on rend ces caisses

parfaitement étanches, on se réserve de grandes facilités pour le placement des planches de pourtour, qui se brisent fréquemment, on abrite les assemblages, et l'on obtient enfin des panneaux d'un aspect agréable, toute la charpente se trouvant cachée.

Enfin l'on arrive à des poids très faibles relativement à la capacité des caisses : ainsi des wagons de ce modèle pouvant contenir 8 bœufs ou 10 vaches, dont les dimensions sont les suivantes, pèsent 3,632 kil. avec roues et bandages neufs. Mais il faut remarquer que dans ce poids de 3,632 kil. est compris celui de la ferrure des portes, d'un genre particulier, dont on parlera plus loin, qui n'a été adopté qu'en raison des avantages qu'il présente, et qui aurait pu être remplacé par des portes à charnières dont les ferrures ne pèseraient que 12 kil. 600, ainsi qu'il en a été posé aux wagons construits au hemin de fer d'Alsace en 1847, au lieu de 108 kil., poids des ferrures des portes à galets.

On devra donc déduire du poids total du wagon 95 kil. 400; représentant la différence de celui des ferrures dans les deux hypothèses, et l'on arrivera au résultat suivant :

Poids du wagon. . . . . 3536 kil.

Longueur.	Caisse : largeur.	Hauteur aux portes.	Hauteur au faîtage.	Surface utilisable	Cube utilisable	Poids.	Poids par m² utilisable	Poids par m³ utilisable
5m.290	2m.590	1m.90	2m.07	13m.711	29m.155	3536k	257k.80	121k.33

Tandis que les wagons de la compagnie du Centre, par exemple, qui ne peuvent contenir que 6 bœufs, pèsent jusqu'à 3,800 kil. et n'ont que :

4.160	2.350	1m.740	2m.260	9m.776	19m.552	3.800k	388	194k

Les wagons du chemin de fer de Tours à Nantes, eux-mêmes, dont les dimensions sont de 4m.38 sur 2m.50, surface 10mq.950, pèsent de 4,300 à 4,500 ; si l'on retranche de ce poids

de 4,400, en moyenne 200 kil., représentant la différence de poids de leur mode d'attelage avec celui adopté dans le wagon dont on vient de parler, il reste toujours un poids de 383 kil. au lieu de 257 kil. par mètre de surface.

Ces derniers résultats ont une immense importance, dont on peut se convaincre en observant qu'un train de 45 wagons, par exemple, composé de wagons anciens contenant 270 bœufs, pesant, poids mort, 171,000 kil., peut être remplacé par un train de 33 wagons pesant 116,688 kil.

Différence. . . . . 54,312 kil.

Si l'on ajoute à cette économie de traction celle qui doit résulter de la différence d'entretien de 45 wagons au lieu de 33, soit un entretien de près d'un quart du matériel, on reconnaîtra l'intérêt que présente ce nouveau mode de construction.

Comme détail de construction :

Les portes à charnières ou à roulettes fixées aux parties mobiles ont été remplacées par des portes garnies d'une lame de fer de 0.^{m}005 posée à plat sur la partie inférieure du cadre et d'une lame de 0^{m}.007 posée sur champ intérieurement à cette partie de la porte et faisant cornière avec la précédente; ainsi disposé, chaque battant, maintenu d'ailleurs à la partie supérieure par deux équerres à œil qui reçoivent une tringle de 25 millimètres, fixée à la moise servant de battant de pavillon, glisse sur une série de galets en fonte tenus à distance entre deux lames de fer par des entretoises aussi en fonte reliant le système aux brancards de caisse au moyen de boulons.

Cette disposition empêche la porte de tomber en route et donne un mouvement facile aux portes, tout en leur permettant de résister aux charges placées à l'intérieur et aux chocs qu'elles produisent en marche; tandis que, dans les wagons dont les portes sont à roulettes fixées aux parties mobiles ou simplement à charnières, ces actions ne tardent pas à détacher les équerres qui portent les roulettes ou à forcer les charnières et les loquetaux de fermeture.

Les rideaux ont été suspendus par des anneaux à une tringle de 0m.015 fixée à la partie supérieure du wagon, et se manœuvrent comme des rideaux ordinaires, pour éviter les inconvénients qui résultent du relevage sur les toits au moment du chargement des marchandises ou lorsque l'on transporte des bestiaux dont les cornes perceraient la toile. Il était utile de s'opposer à l'action de l'eau, qui, se congelant en hiver dans les poches que forment les rideaux relevés, les détruisent rapidement. Enfin, une pente en treillis de 12 à 15 centimètres tombe du bord du toit pour prévenir l'entrée de l'eau entre le battant de pavillon et la partie supérieure des rideaux. Le toit, en sapin de 10 millimètres d'épaisseur, est recouvert de treillis cloué à joints couverts par des chanlattes.

Poids de diverses ferrures du wagon à bestiaux et à marchandises.

4 ressorts de suspension de M. La Salle.	} 135k	
2 id de traction id.		
2 tendeurs	20	
4 chaînes de sûreté avec pitons. . . .	96	
2 crocs de traction avec tige.	35k.800	
2 brides de ressorts de traction. . . .	8	
8 étriers de ressorts de suspension. . .	12	
ferrures de portes	108	

50 wagons de marchandises en construction vont recevoir des plaques de garde modèle anglais pesant chacune 22 kil., et présentant une résistance supérieure à celle des plaques de garde ordinaires, dont le poids est de 35 kil.

L'emploi des moises dans la construction des wagons remonte à l'année 1847; à cette époque 25 wagons à houille furent construits au chemin de fer d'Alsace; leurs dimensions étaient en longueur de 4m.12 à la base et en largeur de 2.m300 aussi en bas; leur caisse était évasée; ils étaient munis de trappes mo-

biles sous le plancher pour le déchargement ; les roues étaient à rayons en fer à cornière et pesaient par paire 714ᵏ, pour un wagon 1,428 kil. La caisse de ces wagons était composée de montants inclinés pris à leur sommet par des moises et appuyés sur des contrefiches.

Ces wagons, dont le poids total est de 3.500 kil., et chargent 7,000 kil. de houille, n'avaient pas de flèche appréciable en 1849.

Note sur les raccords des machines locomotives avec les tenders,

Par M. C. POLONCEAU.

Jusqu'ici pour le raccord des machines avec leurs tenders on a employé des tuyaux en toile ou des rotules articulées.

Les tuyaux en toile ont l'inconvénient de s'user très vite, si l'on réchauffe l'eau du tender avec la vapeur perdue de la chaudière, et de laisser échapper beaucoup d'eau ; enfin, leur inconvénient le plus grave est de laisser introduire beaucoup d'air à l'aspiration des pompes.

Les rotules métalliques sont fort coûteuses ; elles exigent un entretien très dispendieux, et nécessitent de la part du mécanicien les soins les plus minutieux pour être toujours serrées de manière à ne pas perdre l'eau et être cependant assez libres pour permettre les mouvements en tous sens. Il arrive quelquefois qu'elles se brisent par trop de serrage ou par le grippement. En outre, les rotules métalliques exigent des garnitures en chanvre, qui, usées ou mal faites, s'introduisent dans les clapets des pompes, en entravent et en arrêtent la marche. De plus, ces appareils laissent passer des quantités d'air assez importantes qui nuisent beaucoup à l'effet utile des pompes.

Pour remédier à ces inconvénients, on joint la machine au tender par un tuyau continu en cuivre rouge (planche n° 20, fig. 7 et 8), faisant sous le tender, auquel il est suspendu par des chaînettes, un contour suffisamment développé pour que l'élasticité du métal permette tous les mouvements.

Ce moyen, très simple, est parfaitement suffisant et ne présente aucun des inconvénients des raccords adoptés jusqu'à ce jour.

Il a été employé pour la première fois sur le chemin de fer de Versailles (rive gauche) vers la fin de 1840, et aujourd'hui ce raccord existe encore sans avoir nécessité de réparation.

Il a été appliqué dernièrement aux cinq dernières machines construites en 1849 pour la ligne d'Orléans, et les résultats en sont très satisfaisants. L'entretien est nul et les pompes donnent avec beaucoup plus d'abondance qu'avec tout autre système de raccords.

Note sur une nouvelle balance de sûreté employée sur les machines locomotives,

Par M. C. POLONCEAU.

Les chaudières à vapeur sont construites et timbrées pour marcher à une pression qui ne dépasse pas un chiffre calculé et fixé à l'avance. Or, comme d'un côté la conduite du feu fait varier la production de vapeur et par conséquent sa tension dans la chaudière, et que, d'un autre côté, le travail qui s'opère n'est pas constant et produit des variations dans l'emploi de la vapeur, il en résulte qu'il y a souvent dans la chaudière une surabondance de vapeur à laquelle il faut donner issue dans un temps quelquefois très court.

C'est pour ce motif que l'on applique des soupapes de sûreté à toutes les chaudières à vapeur.

Dans les machines locomotives surtout les inégalités de tension de la vapeur sont fréquentes et varient dans des limites très étendues. Les chaudières de ces machines doivent produire en effet une très grande quantité de vapeur dans un temps très court; elles ont une capacité très restreinte et le travail y est excessivement irrégulier, puisqu'elles passent très souvent de leur maximum de travail à un travail nul. Il en est ainsi, par exemple, toutes les fois qu'on arrête aux stations ou qu'un accident force à un arrêt brusque pour lequel on n'a pas eu le temps de préparer la machine, c'est-à-dire de ralentir l'action du feu ou de réduire à l'avance la pression.

Par suite du mouvement de ces machines on a été conduit à fixer au moyen de ressorts les leviers des soupapes de sûreté. Ces ressorts sont disposés de telle sorte que chaque fraction égale de leur course correspond à une augmentation égale de pression sur la soupape. Jusqu'ici cette course de ressorts était d'environ 7 à 12 millimètres par atmosphère. Au-

jourd'hui, lorsque les machines marchent à 7 atmosphères, l'administration publique exige que la levée des soupapes soit de 15 millimètres au moins par atmosphère, le rapport du bras de levier de la soupape à celui d'action du ressort étant de 1/10. On exige, en outre, qu'un intervalle au moins égal à celui du parcours de 2 atmosphères soit ménagé entre les divisions de l'échelle correspondante à 7 atmosphères et le point extrême de la course du ressort.

Il résulte de ces diverses dispositions que dans les machines ordinaires une levée de soupape de $0^m.0007$ à $0^m.0012$ correspond à une augmentation de pression de 1 atmosphère, et que dans les machines timbrées à 7 atmosphères la levée de soupape de $0^m.0015$ correspond également à 1 *atmosphère*.

Or, avec les dimensions ordinaires des soupapes ($0^m.100$ de diamètre), la quantité de vapeur qui peut sortir par suite de ce soulèvement est de 258 litres par seconde. De sorte que, dans presque tous les cas de surabondance de vapeur dans la chaudière, la pression s'élève d'une quantité considérable. C'est en vue de ce phénomène que l'administration publique prescrit de laisser libre, outre la course nécessaire et calculée, une course correspondante à 2 atmosphères, c'est-à-dire qu'elle admet que des chaudières timbrées à 7 atmosphères peuvent supporter instantanément une pression de 9 atmosphères.

Il est évident qu'il y a là un vice grave dans les appareils de sûreté, puisque l'issue donnée à la vapeur est très petite comparativement à la puissance de production de la chaudière et que la sortie de la vapeur ne s'obtient qu'au moyen d'une augmentation très notable de la pression.

Un appareil qui, lorsqu'on dépasserait la pression maximum, réduirait la force du ressort, c'est-à-dire permettrait de laisser dégager l'excédant de vapeur sans que la pression de la chaudière pût augmenter, serait un perfectionnement très utile et très désirable.

C'est celui qu'ont imaginé MM. Vallée, chef des travaux des

ateliers du chemin de fer d'Orléans, et Lemonnier, contremaître de l'ajustage de ces mêmes ateliers.

Ce mécanisme, très simple, et qui a l'avantage de s'adapter à toutes les balances à ressort existantes, consiste (planche 21, fig. 12, 13 et 14) dans le déclic à un point fixe d'un levier qui joint deux parties séparées de la tige de la balance. Ces deux parties sont jointes elles-mêmes au moyen de boulons formant articulation avec une barre de fer qui forme maillon et se prolonge du côté supérieur au delà des deux points d'articulation. En abaissant ce levier on réduit la longueur de la tige de la balance de deux fois la longueur du maillon, et en le lâchant, la tige s'allonge et reprend sa dimention primitive.

Pour faire fonctionner l'appareil, on maintient le levier abaissé en le faisant glisser entre 2 tasseaux fixés sur le corps de la balance, de sorte que la soupape peut fonctionner comme à l'ordinaire tant que le levier glisse entre ses guides; quand la tension du ressort force le levier à dépasser ces mêmes guides, il s'échappe, et, la tige s'allongeant de deux fois la longueur du maillon, la soupape n'est plus chargée que par une tension beaucoup plus faible que celle qui avait lieu avant le déclic du levier.

Le mécanicien peut remettre l'appareil dans sa position normale dès que la vapeur sortie a ramené la pression dans la chaudière au chiffre réglementaire.

D'après cette description sommaire de l'appareil on voit qu'il est facile de régler à volonté par la position des tasseaux la pression que le mécanicien ne peut jamais dépasser. On voit, en outre, que par la longueur du maillon qui unit les deux parties de la tige de la balance on peut déterminer la quantité dont la soupape doit se lever pour laisser échapper la vapeur lorsque la tension dans la chaudière dépasse le maximum fixé.

Cet appareil, essayé sur des locomotives du chemin d'Orléans, a fonctionné d'une manière très satisfaisante, et a

donné des garanties de sécurité bien suffisantes. On voit en outre qu'il peut indiquer toutes les infractions aux règlements qui défendent aux mécaniciens de dépasser la pression pour laquelle leurs chaudières sont timbrées.

Note sur la machine à cintrer et arrondir les bandages de M. Buddicom et C^e^, à Sotteville, et sur les bandages sans soudure de MM. Petin et Gaudet, à Rive-de-Gier,

Par M. FÈVRE.

Dans cette machine, le bandage à cintrer ou à arrondir est pris entre deux galets agissant comme laminoirs; au sortir de ces galets, il rencontre l'un après l'autre deux autres galets directeurs qui lui font prendre le cintre et le diamètre voulu.

La planche n° 21, fig. 1, 2, 3, 4 et 5, gravée sur les dessins que M. Buddicom a eu l'obligeance de me communiquer, fait voir clairement les dispositions de la machine dans toutes ses parties.

La conduite des opérations offre les particularités suivantes :

Cintrage. Le bandage est employé tel qu'il vient de la forge, ses extrémités affranchies carrément : il n'est donc point refoulé comme à l'ordinaire pour faire la soudure; seulement il est commandé un peu plus épais et aussi plus court, de manière à conserver le même poids. On le sort du four au rouge cerise; d'un coup de masse en bois, on commence à ployer légèrement un des bouts et on l'engage entre les deux galets. Un ouvrier agissant sur les manettes exerce la pression nécessaire pour entraîner le bandage. Une révolution complète suffit pour que le cintrage soit parfait.

Après le cintrage, succède l'opération du soudage par coins comme à l'ordinaire. Préalablement, à l'aide d'une chaude ou deux, on prépare la place des coins en coupant à la tranche les quatre angles qui terminent les deux extrémités juxtaposées du bandage.

Arrondissage. On sort le bandage du four au rouge cerise. On lui fait faire dans la machine dix révolutions ou plus.

On le réduit ainsi peu à peu d'épaisseur en l'allongeant jusqu'à ce qu'il ait bien le diamètre de pose. L'endroit de la soudure, qui peut être un peu amaigri, fatigue peu et finalement se trouve de la même épaisseur que le reste du bandage.

Dans le cintrage comme dans l'arrondissage, la vitesse du bandage est environ de 10 centimètres par seconde, la même à peu près que dans les tours à roues.

Les principaux avantages que me paraît offrir cette machine, sont : 1° pour cintrer comme pour arrondir, le nombre des ouvriers nécessaires est réduit à un forgeron, un aide aux galets, et aux manœuvres pour porter le bandage; 2° les ouvriers sont moins fatigués, parce que la machine fait tout le travail, et parce que la chaleur à laquelle ils sont exposés est plus modérée; 3° le refoulage des extrémités du bandage est supprimé, et, partant, il y a économie de main-d'œuvre et de combustible; 4° le cintrage et l'arrondissage sont beaucoup mieux faits que par les procédés antérieurs. En outre, la qualité du fer ne paraît point devoir être en aucune façon altérée par ces deux opérations; 5° l'alésage devient superflu. Il en est à peu de chose près de même du tournage, lequel se réduit strictement à ragréer le boudin et les joues intérieures et extérieures du bandage, d'où il résulte une économie importante de main-d'œuvre et de matière. En outre, on a cet avantage, que l'on conserve à la face de roulement la croûte du fer, à laquelle on attribue généralement plus de dureté et plus de durée.

Depuis la rédaction de la note sur la machine à arrondir de M. Buddicom, MM. Petin et Gaudet sont parvenus à fabriquer économiquement des bandages tout cintrés sans soudure. Ces produits nouveaux sont d'une grande perfection. A la qualité précieuse d'être d'une seule pièce ou sans soudure, ils joignent à un haut degré tous les avantages que nous avons signalés ci-dessus dans les bandages préparés avec la machine de M. Buddicom. Cette dernière machine, qui nous avait paru un perfectionnement réel à côté des procédés usités antérieure-

ment, perd aujourd'hui une grande partie de son intérêt.

Nous avons vu au mois de mars 1851 la nouvelle fabrication de MM. Petin et Gaudet; voici en peu de mots en quoi elle consiste.

A l'aide d'un double corroyage au laminoir, on prépare une barre de fer plat d'environ 3 centimètres d'épaisseur, 10 centimètres de largeur, et d'une longueur convenable. Au sortir de la dernière cannelure, cette barre est enroulée sur champ sur un mandrin : on obtient ainsi une bague formée d'une hélice à spires contiguës, et tel est le paquet destiné à faire un bandage.

Cette bague est soudée sur plat dans une étampe sous un marteau pilon de 4,000 kilogrammes tombant de 2 mètres; la bague reçoit d'ailleurs deux chaudes suantes au four à réchauffer. Une soudure faite dans de telles conditions devra être très accidentellement défectueuse; il me semble impossible qu'elle vienne à manquer sur une portion importante de spire. La bague ainsi soudée offre l'image du bandage, en petit comme diamètre, en grandeur exacte comme largeur, mais beaucoup plus fort comme épaisseur; le boudin est d'ailleurs ébauché par l'écrasement produit par la panne du marteau.

Ce bandage ébauché reçoit une troisième chaude suante et est porté sur un laminoir spécial, qui, en diminuant progressivement son épaisseur, l'amène au diamètre et à la forme définitive. Au sortir de ce laminoir, le bandage encore chaud est posé sur un mandrin à segments et immergé dans une cuve d'eau froide. On aura l'idée de la machine à laminer les bagues en se représentant un laminoir ordinaire à tôle, sur le prolongement des tourillons duquel on a fait venir de fonte des galets armés de joues, comprenant entre eux une cannelure suivant la forme des bandages.

TABLE DES MATIÈRES.

	Pages
Compte-rendu des travaux de la Société des Ingénieurs civils. (N° 12. — Janvier, février, mars, 1851.)	1
Liste générale des membres de la Société	4
Mémoire n° 26. — Théorie sur la stabilité des machines locomotives en mouvement, par M. Yvon Villarceau	13
Compte-rendu des travaux de la Société des Ingénieurs civils. (N° 13. — Avril, mai, juin, 1851.)	i
Suite du mémoire n° 26	81
Compte-rendu des travaux de la Société des Ingénieurs civils. (N° 14. — Juillet, août, septembre, 1851.)	161
Mémoire n° 27. — Résistance du fer et de la fonte, basé principalement sur les recherches expérimentales les plus récentes faites en Angleterre, par M. Love	163
Suite du mémoire n° 27	241
Compte-rendu des travaux de la Société des Ingénieurs civils. (N° 15. — Octobre, novembre, décembre, 1851.)	273
Mémoire n° 28. — Causes des inondations souterraines qui se manifestent dans les quartiers nord de Paris dans certaines circonstances déterminées, par M. E. Vuigner	277
Mémoire n° 29. — Emploi des moises dans la construction des wagons, par M. Debonnefoy	284
Note sur les raccords des machines locomotives avec les tenders, par M. C. Polonceau	293
Note sur une nouvelle balance de sûreté employée sur les machines locomotives, par M. C. Polonceau	295

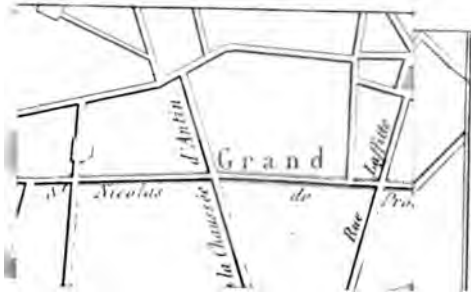
Pages

Note sur une machine à cintrer et à arrondir les bandages établie dans les ateliers de M. Buddicom et compagnie, à Sotteville, et sur les bandages sans soudure, de MM. Petin et Gaudet, à Rive-de-Gier, par M. Fèvre 296

Table des matières. 303

CHEMIN DE FER.

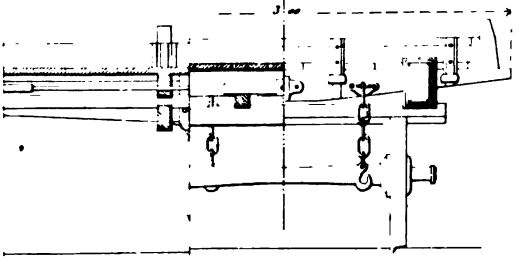
Pl 20.



Plan de Paris
avec tracé
du
grand Égout

Fig. 1

t et Coupe en travers. Fig 11.



J.emaire sculp

SOCIÉTÉ

DES

INGÉNIEURS CIVILS

SOCIÉTÉ

DES

INGÉNIEURS CIVILS

IMPRIMERIE DE GUIRAUDET ET JOUAUST,
338, RUE SAINT-HONORÉ.

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ

DES

INGÉNIEURS CIVILS

FONDÉE LE 4 MARS 1848

ANNÉE 1852

Paris

RUE BUFFAULT, 26

Errata au Mémoire sur la résistance du fer et de la fonte.

Page 175, § 12, au lieu de $PL = \frac{1}{6} T\overline{EH}^2$, il faut $PL = \frac{1}{6} TEH^2$.

Page 178, § 17, en tête des colonnes n° 2 du tableau, mettez la désignation *mil.* pour indiquer que le diamètre des fils est exprimé en millimètres.

Page 226, 14e ligne à partir du haut, au lieu de : *ces résultats diffèrent*, il faut : *ce résultat diffère.*

Page 226, 15e ligne, au lieu de : amincit la tige verticale *vers le bout*, lisez *vers le haut.*

Page 243, § 74, au lieu de : 14 *pieds* 7 *pouces*, il faut : 13 *pieds* 6 *pouces*; — au lieu de 33 *pieds et* 66 *pieds*, il faut : 33 *pouces et* 66 *pouces.*

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

(Janvier, Février et Mars 1852.)

(N° 16.)

Pendant ce trimestre on a traité les questions suivantes :

1° Discussion sur le mémoire de M. Love relatif à la résistance du fer et de la fonte (Voir le résumé des séances, pages 1 à 28);

2° Communication de M. Phillips, ingénieur des mines sur la théorie de la coulisse Stephenson (Voir le résumé des séances, page 29);

3° Communication de M. Le Chatelier, ingénieur en chef des mines, sur la distribution de la vapeur dans les cylindres, et sur une disposition qui permet d'augmenter le passage dans les lumières pendant l'admission de vapeur (Voir le résumé des séances, pages 39 à 40 et 48 à 55);

4° Communication de M. Jules Poirée, ingénieur des ponts et chaussées, relative à l'évaluation de la puissance et des consommations produites par les machines locomotives employées au remorquage des trains de voyageurs entre Paris et Montereau (Voir le résumé des séances, pages 55 à 58);

5° Emploi des rondelles en caoutchouc vulcanisé, préparé

par la méthode américaine (Voir le résumé des séances, page 41);

6° Construction des bateaux à vapeur destinés à transporter à Londres le charbon du littoral de l'est de l'Angleterre (Voir le résumé des séances, pages 59 et 60);

7° Communication de la discussion qui a eu lieu à la Société des Ingénieurs civils de Londres sur un mémoire de M. Adams relatif à la construction et à l'entretien de la voie des chemins de fer en Europe, et sur les systèmes les plus convenables pour des contrées telles que l'Egypte et l'Inde (Voir le résumé des séances, pages 61 à 73);

8° Discussion sur le mémoire de M. Pottier relatif au chauffage de l'église Saint-Roch (Voir le résumé des séances, pages 73 à 77).

Pendant ce trimestre la Société a reçu :

De M. Guettier, les ouvrages suivants qu'il a publiés :

1° De la fonderie telle qu'elle existe aujourd'hui en France;

2° Recherches pratiques sur les alliages des métaux;

3° Notice sur l'école d'arts et métiers d'Angers;

4° Expérience sur la coulée des moules en coquilles;

5° Notice sur les minerais d'étain récemment en exploitation à la Villedes (près le roc Saint-André dans le Morbihan).

De M. Toni Fontenay :

1° Un exemplaire de son ouvrage sur la construction des viaducs, ponts-aqueducs, ponts et ponceaux en maçonnerie;

2° Un exemplaire de sa notice sur la construction des tunnels de Saint-Cloud et de Montretout, sur le chemin de fer de Versailles (rive droite);

3° Une note sur le perfectionnement du niveau à réflexion de M. Burel, et sur son emploi.

De M. Yvon Villarceau, un exemplaire de son troisième mémoire sur les étoiles doubles. (Extrait des comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences.)

De M. Love, une note sur la construction des ponts biais en maçonnerie.

De M. Petitgand, une note sur la construction des fours employés en Espagne pour le traitement des minerais de plomb.

De MM. Lavalley et Mathieu, une note sur la reconstruction en tôle du pont de la route de Clichy, sur le chemin de fer de Saint-Germain.

De M. de Fontenay, une note sur quelques corps gras employés pour le graissage des outils, machines et wagons aux chemins de fer d'Orléans et du centre.

De M. Polonceau, un calque du pont américain exposé au Palais de Cristal, à Londres.

Les membres nouvellement admis sont les suivants, savoir :

Au mois de janvier :

MM. Romme, présenté par MM. J. Petiet, G. Loustau et Chobrzynski.

Masselin, présenté par MM. Faure, Priestley et Piquet.

Farcot (Jean-Joseph-Léon), présenté par MM. Thomas (Léonce), Laurens et Calla.

Au mois de mars :

MM. Garnier (Paul), présenté par MM. Eug. Flachat, J. Petiet et Rhoné.

Dulong, présenté par MM. Eug. Flachat, E. Vuigner et Edwards.

Petit de Coupray, présenté par MM. Eug. Flachat, E. Vuigner et C. Polonceau.

Marsillon, présenté par MM. Eug. Flachat, Chabrier et H. Mathieu.

Windisch, présenté par MM. Eug. Flachat, Rhoné et Chabrier.

Renard, présenté par MM. Faure, G. Loustau et Priestley.

LISTE GÉNÉRALE DES SOCIÉTAIRES AU 1er JANVIER 1852.

Membres du Bureau.

Président :

M. E. Flachat ✻✻, rue de Londres, 51.

Vice-présidents :

MM. Emile Vuignier ✻, rue du Faubourg-Saint-Denis, 146.
Charles Callon, rue des Vosges, 13.
J. Petiet ✻✻, rue Lafayette, 34.
C. Poloncau ✻, boulevart de l'Hôpital, 4.

Secrétaires :

MM. Adolphe Bellier, rue Saint-Honoré, 83.
Léon Yvert, rue Bleue, 5.
Henri Mathieu, rue Rougemont, 10.
E. Gerber, rue Richer, 10.

Trésorier :

M. Loustau, rue Saint-Quentin, 23.

Membres du Comité.

MM. Faure, boulevart Saint-Martin, 55.
Cavé ✻, rue du Faubourg-Saint-Denis, 214.
Yvon Villarceau, rue Cassini, 14.
A. Salvetat, à Sèvres (Manufacture nationale).
Nozo, place du Château-Rouge, 2, à Montmartre.
Degousée, rue Chabrol, 37.
Houel ✻, quai de Billy, 48.
Bergeron, rue de Lille, 79.
P. Seguin, rue Louis-le-Grand, 3.
Knab, rue de Seine, 72.
Stéphane Mony ✻, rue d'Alger, 9.
Léonce Thomas ✻, rue des Beaux-Arts, 2.

Victor Bois, place du Hâvre, 14.
La Salle, rue Saint-Georges, 58.
Pepin-Lehalleur ✻, rue de la Victoire, 14.
A. Barrault, rue de Clichy, 63.
M. Alcan, rue d'Enghien, 28.
Calla ✻, rue Lafayette, 11.
Evrard, rue Popincourt, 71.
Chobrzinsky, rue du Nord, 11.

Sociétaires.

MM. Aboilard, boulevart Beaumarchais, 91.
Albrizio.
Alby, place Carline, 11, à Turin.
Alquié, rue d'Enghien, 15.
Armengaud, rue Saint-Sébastien, 45.
Arson, à Vaux (Seine-et-Oise).
Andry (Alfred), à Boussu, près Mons (Belgique).
Badarous, en Algérie.
Bardon, quai d'Austerlitz, 75.
Baumal (Henri), rue de Bercy, 2, à Bercy.
Beaumont (Victor).
Belval.
Bénard, rue Rochechouart, 38.
Benoist du Portail, rue Saint-Jacques, 75.
Bertholomey, rue de la Roquette, 90, à la raffinerie.
Bertot, boulevart du Temple, 42.
Beugnot, à Mulhouse, maison Kœchlin.
Bevan de Massy, boulevart Montmartre, 3.
Biver, à Biache-St-Waast, près Vitry (Pas-de-Calais).
Blacher, à Avignon, Mson Gostlob, r. des Marchands, 10.
Blanche, à Puteaux (Seine).
Blard, chef de dépôt à Varades chemin de fer de Tours à Nantes).
Blonay, chez M. Dietchrich, maître de forges, à Niederbronn (Bas-Rhin).

Bonnefoi (De), rue de Vendôme, 24.
Bonnet (Félix), rue de Sèvres, 8.
Blot (Léon), au chemin de fer de Bordeaux à Tours, à Tours.
Bordet, à Remilly, par Sombernon (Côte-d'Or).
Borie, boulevart Poissonnière, 24.
Bossu, directeur adjoint de la saline de Dieuze (Meurthe).
Boucart, Faubourg-Poissonnière, 98 et 100.
Boudard, rue Saint-Denis, 313.
Boudsot, en Egypte.
Bougère, à Angers.
Bourcart, à Guebwiller (Haut-Rhin).
Bourdon ✻, au Creusot.
Bourgougnon, aux Batignolles, rue Notre-Dame, 1.
Bousson, à Roanne (Loire).
Boutin, chez M. Mollerat, fabricant de produits chimiques, à Pouilly-sur-Saône (Côte-d'Or).
Boutmy, rue Blanche, 36.
Bricogne, rue Ribouté, 1 *bis*.
Bridel, rue Mazagran, 8.
Bureau (Jules), rue Mayet, 18.
Buschoff, rue de Crussol, 21.
Belanger, à Fresne-sur-Escaut (Nord).
Caillé, au Creusot (hôtel du Commerce).
Caillet, quai d'Austerlitz, 75.
Cambier, rue de Babylone, 5.
Chabrier, rue d'Amsterdam, 52.
Championnière, rue Ollivier, 4.
Chaplin, rue Pavée-Saint-André, 12.
Chappon, à Bar-sur-Aube.
Chauvel (Emile), à Navart, près Evreux (Eure).
Chavis, rue de l'Echiquier, 27.
Charpentier, rue du Temple, 192.
Chevalier (Emile) ✻, rue la Victoire, 48.

Chevalier (Martial), rue Chauchat, 16.
Chevandier, rue de la Victoire, 22.
Clémandot, à Clichy-la-Garenne.
Comte, en Amérique.
Cornet, rue Meslay, 21.
Corot, pompe à feu de Chaillot, quai de Billy.
Courtépée, rue des Francs-Bourgeois, 7.
Crétin, rue du Faubourg-Saint-Honoré, 105.
Curtel, rue du Court-Debout, à Lille.
Daguin, rue des Francs-Bourgeois, 10.
Danré, à Stockholm (Suède), à Bollhusgrund.
Darblay, à Corbeil.
Debas, rue Bréda, 26.
Debauge ✻, à Tours (Indre-et-Loire).
Deffosse, à Tours, au chemin de fer.
Dejoly, palais de l'Assemblée nationale.
Deligny, en Espagne.
Dellisse, rue du Faubourg-Poissonnière, 98 et 100
De la Rochette, à Givors (Rhône).
Delom (Florentin), rue Montholon, 13.
Deville, rue du Faubourg-Saint-Germain, 70.
Desmazures, boulevart Beaumarchais, 22.
D'Hamelincourt, rue Neuve-Coquenard, 26 *bis*.
Donnay, passage Sandrier, 38.
Dubied (Ed.), à Mulhouse.
Dubois, à Saint-Gaulin, près Mons (Belgique).
Dugourd, au château de Beaurepaire, à Vic, près Breuil (Allier).
Duméry, rue des Petites-Ecuries, 45.
Duolmard, à Saint-Malo (Ile-et-Vilaine).
Durenne, rue des Amandiers-Popincourt, 11.
Durocher, rue de la Verrerie, 83.
Dutilleux, à Cologne, Aposteln-Kloster, 3; à Paris, rue Louis-le-Grand, 8.

Duval (Edmond), aux forges de Paimpont, près Plelan (Ille-et-Vilaine).

Duval-Piron, rue Saint-Denis, 277.

Ebray, Grande-Rue-Verte, 12.

Eck, rue du Vert-Bois, 33.

Edwards ✻, rue du Faubourg-Poissonnière, 55.

Erhard.

Estoublon, aux forges d'Ivoy, à La C.-d'Angillon (Cher)

Faure de Villat, boulevart de la Chapelle, 8.

Fèvre, rue Richer, 26.

Flachat (Adolphe), rue d'Amsterdam, 54.

Fontenay (de), boulevart Beaumarchais, 3.

Fontenay (Toni), avenue Matignon, 3.

Forquenot, à Tours (Indre-et-Loire).

Fournier (J.-B.), à Orléans (Loiret).

Fournier, rue Louis-le-Grand, 3.

Frèrejean, rue de la Tour-d'Auvergne, 21.

Fresnaye, à Maresquel, par Champagne-lez-Hesdin (Pas-de-Calais).

Gallicher, forges de Rigny, près Châteauneuf (Cher).

Gannéron, rue de Chabrol, 14.

Garnaud, rue de l'Abbaye, 14.

Gastellier, rue des Filles-du-Calvaire, 18.

Gayrard (Gustave), rue Saint-Nicolas-d'Antin, 46.

Gentilhomme, quai de la Tournelle, 45.

Getting, avenue Dauphine, à Passy.

Geyler (Alfred), rue de Buffault, 18.

Girard, rue de Trévise, 5.

Gollnisch, rue des Petites-Ecuries, 53.

Gonssolin, à Alger.

Gonzenbach, chez M. Hartmann, constructeur à Chemnitz (Jura).

Gouin ✻, rue Neuve-des-Mathurins, 26.

Goschler, administration des chemins de fer de Strasbourg à Bâle, faubourg de Saverne, à Strasbourg.

Gouvion, au chemin de fer de St-Germain, r. St-Lazare.
Grandvoinnet, répétiteur à Grignon.
Granier.
Grenier (Achille), route de Paris, à Vincennes.
Grouvelle, rue de la Sorbonne, 5.
Grosset, à Tours.
Grun, à Guebwiller (Haut-Rhin).
Guelle, rue des Fossés-Saint-Marcel, 39.
Guénard de la Tour, aux forges de Saucourt, par Joinville (Haute-Marne).
Guérard, rue du Haut-Pavé, à Epernay.
Guettier, aux forges de Marquise (Pas-de-Calais).
Guibal, rue Pargaminières, 71, à Toulouse.
Guibal, à l'école des Mines, à Mons (Belgique).
Guillaume, à Angers.
Guntz.
Germon, à Epernay, rue des Fusiliers.
Haussoullier, rue Notre-Dame, aux Batignolles.
Hermary, à Lambres (Pas-de-Calais).
Holcroft, à Tours (Indre-et-Loire).
Holm, en Angleterre.
Hovine, boulevart Beaumarchais, 62.
Hubert, rue Blanche, 69.
Huet, rue de Buffault, 13.
Humblot (Léon), à Metz (Moselle).
Hervier, à Saint-Germain.
Jullien, à Montataire (Oise).
Koechlin, rue de Chabrol, 63.
Klafft (Ed.), à Strasbourg.
Lachèvre, à Rouen (Seine-Inférieure).
Laborie (de), quai de Béthune, 18.
Labouverie, à Bouillon (Ardennes).
Lalo, rue Saint-André-des-Arts, 45.
Laligant, à Maresquel, par Champagne-lez-Hesdin (Pas-de-Calais).

Langlois (Ed.), rue de la Tour-d'Auvergne, 21.
Landry, à Pithiviers.
Lapersonne, rue de Paradis-Poissonnière, 44.
Lassalle, boulevart National, à Marseille.
Lasseron, à Tours.
Laurens, rue des Beaux-Arts, 2.
Laurent (Victor), à Planchay-les-Mines, près et par Champagny (Haute-Saône)
Lavallet, rue de Tivoli, 3.
Lebon (Eugène), rue Richelieu, 110.
Lecler (Achille), à Asnières.
Lecouvre, rue des Francs-Bourgeois, 25.
Lecointe, rue Bréda, 22.
Lefrançois, à Pithiviers (Loiret).
Lemaire, conducteur des ponts et chaussées, rue des Réservoirs, à Versailles.
Lemaire-Teste, boulevart Beaumarchais, 79.
Lemoinne, à Bar-le-Duc.
Lepeudry, rue Montholon, 28.
Leroy, à Bar-le-Duc.
Letrange.
Lisboa.
Lichsteinsten (Paul), à Montpellier (Hérault).
Lorentz, rue Blanche, 83.
Loisel, boulevart Beaumarchais, 89.
Love, rue du Bac, 81.
Loyd, chez M. Gouin, aux Batignolles.
Limet, rue d'Enghien, 28.
Mangeon, à Melun.
Marais, à la Chapelle-Saint-Denis.
Mariotte, à Orléans (Loiret).
Mathias (Félix) ✻, chemin de fer du Nord, à Paris.
Mathias (Ferdinand), à Lille (chemin de fer du Nord).
Mares, rue Salle-l'Evêque, à Montpellier.
Marguet, à l'école industrielle de Lausanne (Suisse),

Martenot, à Ancy-le-Franc (Yonne).
Martin, à Besançon (Doubs).
Martin (Charles), à Bourg (Ain).
Maire, rue d'Enghien, 11.
Mayer, rue Notre-Dame-de-Lorette, 36.
Mélin, rue Neuve-Coquenard, 11.
Mesdach, rue Saint-Paul, 28.
Mesmet, Grande-Rue, 41, à Saumur.
Meyer, boulevart de la Madeleine, 17.
Michelant, à Tours.
Mignon, rue de Thorigny, 8.
Mirecki, à la station d'Amiens.
Miranda (de), en Espagne.
Mitchell, boulevart Beaumarchais, 74.
Montcarville (de), place des Vosges, 26.
Morard, rue de Flandre, 59, à la Villette.
Moreau (Albert), rue de Lille, 21.
Morin (G.), à la Croix-Rouge, banlieue de Marseille.
Moureau, rue des Carrières, 25, à Charenton.
Nancy, à Strasbourg (Haut-Rhin).
Nillis (Auguste), rue Blanche, 69.
Oriolle, à Saumur.
Paquin, à Mulhouse.
Pecquet (Nemours), rue Buffault, 12.
Petitgand, rue Bleue, 5.
Perdonnet ✻, au chemin de fer de Strasbourg.
Petre, à Rive-de-Gier, chez M. Jackson; à Paris, rue Notre-Dame-de-Nazareth, 25.
Picard, cité de l'Union, 2.
Piquet, rue de Bondy, 52.
Planhol (de), à Braffac, près Jumeaux (Puy-de-Dôme).
Poinsot, au Conservatoire des Arts et Métiers.
Pommier (Alphonse), à San-Francisco (Californie).
Pot, Grande-Rue-Marengo, 20, à Marseille.
Pothier, rue de l'Arcade, 14.

Pottier (Ferdinand), rue des Beaux-Arts, 9.
Poupé, rue de Flandres, 57, à la Villette.
Poussin (le major), rue Richer, 43.
Priestley, rue Pavée-Saint-Antoine, 3.
Proal, rue du Pont-de-la-Réforme, 1.
Pury (de), à Neufchâtel (Suisse).
Quétil, cour des Petites-Ecuries, 16.
Raabe, à Rive-de-Gier (Loire).
Redon, à Limoges.
Regel (de), à Strasbourg (Bas-Rhin).
Reynaud (Ch.), à Cette (Hérault).
Reytier, à Epinac (Saône-et-Loire).
Rérolle, rue Saint-André-des-Arts, 13.
Rhoné, rue Saint-Lazare, 126.
Ruoltz (de), rue de Verneuil, 53.
Richard, à Vitry-le-Français.
Richard, à Düsseldorf.
Riche, rue des Marais-Saint-Martin, 95.
Rider.
Rivier, professeur de physique à Lauzanne (Suisse).
Rossire, à Mazargues, près Marseille.
Rudler, rue Jean-Goujon, 6.
Salleron, à Sens (Yonne).
Sautin, rue de Seine, 6.
Saulnier (Ernest), rue d'Enfer, 8.
Schmerber, à Mulhouse.
Schlincker, à Creutzwald (Moselle).
Scribe, en Californie.
Servel, quai de Béthune, 24.
Slavecki, garde-mine de 2e classe, à Rouen.
Sautter, rue de la Victoire, 90.
Sciama, rue Pigale, 48.
Steger, boulevart de l'Hôpital, 4.
Thauvin, rue de Lancry, 10.
Thétard, à Tours.

THEVENET, à Grenoble.
THOMAS (Frédéric), chemin de fer de Tours à Nantes, à Tours.
THOMAS (Emile), Faubourg-Poissonnière, 98 et 100.
THOMAS (Pierre), Faubourg-Poissonnière, 98 et 100.
TOURNEUX fils, rue de Penthièvre, 25.
TRÉLAT (Emile), rue de Londres, 51.
VALÉRIO, à Vieille-Montagne, près Liége.
VALLIER, à Versailles, rue Nationale, 75.
VERDAVAINE.
VIGNEAUX, à Aiguillon (Lot-et-Garonne).
VILLAIN, rue Saint-Germain-des-Prés, 12.
VINCHON, rue de Choiseul, 25.
VOLLANT, à Vitry-le-Français.
VILLAINE (Achille de), à Roanne (Loire).
VIRON, au chemin de fer de Tours à Nantes, à Tours.
VOLSKI, quai Maison-Rouge, à Nantes.
VUILLEMIN, à Metz.
WEIMBERGER, rue Mazagran, 10.

MÉMOIRE N° XXX.

Expériences faites sur le calorifère de Saint-Roch pendant l'hiver de 1848 à 1849,

PAR M. F. POTTIER,

Inspecteur du matériel et de la traction au chemin de fer de Strasbourg.

Le calorifère de l'église Saint-Roch, à Paris, a été établi par M. Grouvelle pendant l'hiver de 1845 à 1846.

Par suite de la mauvaise direction du chauffage, résultat d'une économie mal entendue, l'appareil produisait très peu pendant les deux premiers hivers.

En 1848, MM. Gauthier de Claubry, Thomas et Gentilhomme furent choisis comme experts pour examiner l'état des choses. Chargé par eux de suivre et de diriger tous les détails de l'expérimentation, j'ai été à même de recueillir pendant soixante-quatre jours consécutifs une série d'observations longues et minutieuses, dont je vais consigner ici les résultats.

DESCRIPTION DE L'ÉGLISE.

Un mot d'abord sur la disposition du local à échauffer.

Dimensions principales du bâtiment. — L'église Saint-Roch est un bâtiment d'environ 110 à 115 mètres de long sur 28 de large et 15 à 18^{m} de hauteur moyenne. (Planche n. 23, fig. 2.)

Sa superficie est d'environ	3100 à 3200^{mq}.
Sa capacité intérieure.	31700^{mc}.
La surface intérieure des murs extérieurs. .	5835^{mq}.
La surface des vitres.	860^{mq}.
Le cube des murs.	5300^{mc}.
qui se divisent en	
Murailles exposées au refroidissement extérieur.	3500^{mc}.

Murs et piliers complétement intérieurs. . . 1800^{mc}.

L'église contient environ 3500 places assises et réunit :

Les dimanches ordinaires. . . . de 2000 à 4000 personnes.
Les fêtes ordinaires. . . . . de 4000 à 6000 »
Les grandes fêtes, telles que Pâques,
Noël, etc. . . . . de 6000 à 8000 »

Division du bâtiment. — L'ensemble du vaisseau se divise en trois parties bien distinctes :

La première et la plus grande a 28^{m} de largeur et 68^{m} de longueur. Elle comprend la nef, le chœur, les bas-côtés et les chapelles latérales. La hauteur de la voûte principale est de 17 à 18^{m}.

La seconde partie est formée par la chapelle de la Vierge, chapelle circulaire d'environ 30^{m} de diamètre, y compris les bas-côtés, et surmontée d'un dôme qui a environ 25^{m} d'élévation.

Enfin, dans la partie la plus reculée de l'église, se trouve le calvaire, partie basse, froide et humide, dont les voûtes principales n'ont que 5 mètres d'élévation, et dont les vitraux étaient, à cette époque, dans le plus déplorable état. Cette partie de l'église a depuis été l'objet d'une réparation considérable.

Causes de refroidissement. — Outre la cause normale de refroidissement par les vitres et murailles extérieures dont j'ai donné plus haut la surface, il y en a une anormale, qui provient de la fermeture incomplète ou nulle des très nombreuses ouvertures dont l'édifice est percé ainsi. :

Il y a 64 fenêtres présentant une superficie totale d'environ 860^{mq}, six portes donnant à l'extérieur, et une certaine quantité de petites portes donnant sur la Sacristie, sur des tribunes, des escaliers intérieurs, etc.

Les fenêtres sont toutes en mauvais état. Un observateur placé en bas ne peut guère s'en apercevoir, il est vrai, mais si l'on circule sur la corniche intérieure ou extérieure au niveau des fenêtres, on découvre un nombre considérable d'ouvertures quelquefois très grandes. Ainsi

les vitraux, réunis par des lamelles de plomb, laissent à chaque joint un intervalle appréciable de 1 à 4 millimètres. Chacune des 64 fenêtres porte deux panneaux mobiles sur charnières, qui offrent par fenêtre un périmètre de 5 à 6 mètres présentant une ouverture permanente qui va en certains endroits jusqu'à 5 et 6 centimètres.

Les vitraux très nombreux du calvaire étaient dans un état plus déplorable encore.

Enfin la voûte de la nef est percée de 87 trous destinés à laisser passage aux cordes qui supportent les lustres; ayant en moyenne 7 centimètres de diamètre, et placés à l'énorme hauteur de 18 mètres, ils produisent un tirage suffisant pour éteindre brusquement une bougie.

On ne s'étonnera donc pas si un relevé minutieux de toutes ces ouvertures donne pour résultat total une surface de $14^{mq}.15$ à une hauteur moyenne de $11^{m}.20$ au dessus du sol (1).

Telles sont, en résumé, les dispositions générales de l'édifice, dont toute la partie supérieure, dépassant les constructions voisines, et constamment balayée par de vifs courants d'air, est exposée au rayonnement direct dans l'espace : ces diverses circonstances présentent des conditions défavorables au chauffage.

SYSTÈME DE CHAUFFAGE.

Le système adopté par M. Grouvelle est une circulation d'eau chaude à basse pression ; mais les tuyaux de circulation ne chauffent pas direc-

---

(1) La hauteur moyenne a été calculée par la loi des centres de gravité. Soit s, s', s'', etc., les surfaces partielles, h, h', h'', etc., la hauteur de leurs centres de gravité, S la somme des surfaces, et H la hauteur hypothétique cherchée, on a $SH = \Sigma sh$; d'où l'on tire H.

tement par rayonnement ; ils ne font qu'échauffer préalablement de l'air qui est ensuite versé dans l'église. Ce n'est donc, en réalité, qu'un calorifère à air chaud, dans lequel l'air, au lieu d'être échauffé directement par un ou plusieurs foyers, l'est indirectement par une circulation d'eau unique.

Le choix de ce système était très judicieux. Un chauffage par rayonnement direct eût sans doute été plus économique, mais dans le cas présent il était inadmissible, toute disposition apparente étant incompatible avec la destination de l'édifice. Il n'y avait donc pas d'autre moyen que de verser dans l'intérieur de l'air chaud. Or, échauffer directement cet air dans un foyer unique eût présenté de graves difficultés. Il est douteux que l'on fût parvenu à répartir uniformément et convenablement dans toute l'étendue du bâtiment de l'air pris à ce foyer. Les pertes de chaleur dans un trajet considérable eussent été très fortes ; pour les éviter, il eût fallu porter l'air à une très haute température, et chacun sait combien ce système est défectueux au double point de vue économique et hygiénique ; de plus, il eût fallu faire de grandes dépenses pour diminuer autant que possible la déperdition par les tuyaux.

Multiplier les foyers présente l'inconvénient d'une surveillance plus difficile, et, d'ailleurs, la disposition souterraine des lieux ne s'y prête en aucune façon.

Avec la circulation d'eau chaude, au contraire, on a :

1° Economie évidente ; puisque l'on a un foyer unique, de l'air chauffé à une basse température, et le trajet de cet air très court avant d'être versé.

2° Répartition de la chaleur très uniforme et très facile, chaque bouche étant indépendante.

3° Disposition très favorable du local.

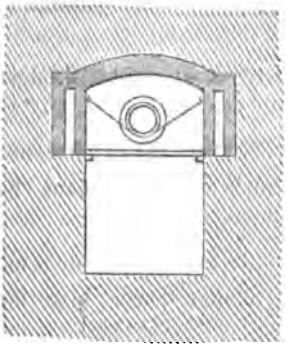
Ajoutons que l'inconvénient des fuites, que l'on peut reprocher aux circulations d'eau en général, est nul ici, tout le système étant souterrain. D'ailleurs, tous les assemblages sont à joints boulonnés, et la cir-

culation est disposée de manière que la visite et la réparation soient très faciles (1).

Description de l'appareil. — Dans un caveau circulaire régnant sous le pourtour de la chapelle de la Vierge est placée une chaudière horizontale d'environ douze chevaux et à deux bouilleurs. (Voir le croquis ci-dessous.)

Un tuyau de fonte de $0^{m}.14$ de diamètre, assemblé à brides et d'environ 168 mètres de développement, part du sommet de la chaudière et passe sous le bas-côté droit de l'église, en montant suivant une pente d'environ $0^{m}.03$ par mètre. Son point culminant est sous l'orgue ; il revient par le côté gauche de l'église, en descendant la même pente, et finit par aboutir à l'un des bouilleurs de la chaudière.

Un petit tuyau additionnel, mis après coup, circule en sens contraire du tuyau principal, côte à côte avec le tuyau de retour, et finit par déboucher dans le précédent au point culminant, c'est-à-dire sous l'orgue. Une circonstance imprévue a nécessité l'addition de ce tuyau : les plans fournis par la ville indiquaient sous les bas-côtés de la nef



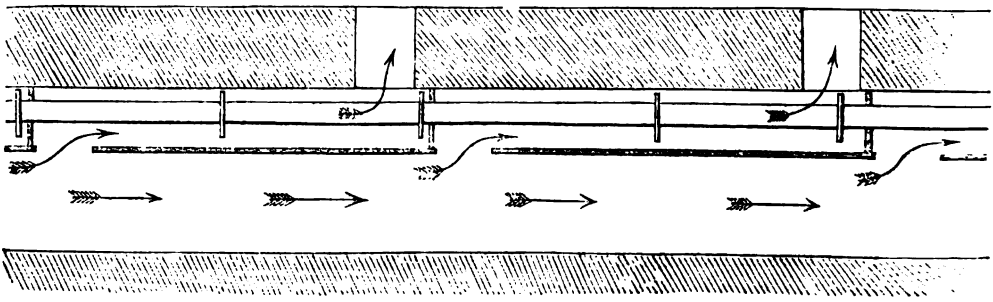
une série de caveaux qui n'existent pas, et le refroidissement subi par l'appareil circulant dans la terre, au lieu d'être isolé dans des caveaux, a forcé d'augmenter la surface de chauffe.

Tous ces tuyaux circulent dans un canal revêtu d'un double muraillement en brique, laissant un certain intervalle vide, comme l'indique le croquis, et dont le but est de diminuer la déperdition de chaleur.

---

(1) Il faut remarquer qu'à cette époque M. Grouvelle n'avait pas encore imaginé l'ingénieuse disposition mixte d'eau et de vapeur qu'il a si heureusement appliquée depuis.

Dans ce canal, suffisamment grand pour qu'on puisse le parcourir



dans toute sa longueur, l'air arrive par quatre larges prises extérieures munies de registres, se chauffe sur les tuyaux, qu'une disposition particulière de planchettes de bois (Voir le croquis ci-dessus) force à lécher sur une certaine longueur, et finit par se verser dans l'église par des grilles placées au niveau du sol.

Un système analogue, mais de plus petites dimensions, part de l'autre extrémité de la chaudière et circule dans la seconde moitié de l'église, c'est-à-dire la chapelle de la Vierge, celle dite de l'Adoration, et le Calvaire.

Le tuyau n'a que 12 centimètres de diamètre et 86 mètres de développement.

Des valves placées sur les tuyaux de départ et d'arrivée permettent de modifier ou même de supprimer totalement la circulation dans chacune de ces grandes artères.

Sur le parcours de l'artère principale, quatre renflements de 3 mètres de longueur et $0^{m}.35$ de diamètre augmentent encore la surface de chauffe.

Quatre autres renflements en forme de poêles de différents diamètres sont placés à l'orifice des bouches principales, et de petits embranchements sans retour favorisent encore le tirage des bouches qui ne sont pas placées directement sur le parcours.

L'air ainsi échauffé est versé dans l'église par vingt-deux bouches

munies de grilles, dont vingt et une présentent chacune une surface vide de $0^{mq}.135$, et la dernière, celle du point culminant placé sous l'orgue, une surface vide de $0^{mq}.400$, ou en totalité $3^{mq}.142$.

Pour ne rien perdre de l'effet utile du combustible, le tuyau de fumée, en tôle, de $0^{m}.35$ de diamètre, sert encore à échauffer de l'air sur un parcours de 7 mètres. Cet air alimente une bouche isolée de la chapelle de la Vierge.

DIMENSIONS GÉNÉRALES DE L'APPAREIL.

Surface de chauffe de la chaudière et des bouilleurs.	$15^{mq}.40$
Surface de la grille.	0 .46
Surface de refroidissement de la circulation . . .	164 .85
Volume de l'eau qui s'échauffe	$3^{mc}.008$
Volume de l'eau qui se refroidit	4 .218
Volume total de l'eau contenu dans l'appareil . .	7 .226
Différence maximum de niveau.	3 à $4^{m}.00$
Température moyenne de l'eau	111°

Cette température est la moyenne de nombreuses observations faites sur quatre thermomètres placés sur les tuyaux de départ et de retour, chaque thermomètre ayant son réservoir appliqué le mieux possible contre le tuyau, et recouvert d'une épaisse couche de ouate.

MÉTHODE D'EXPÉRIMENTATION.

Chaque matin la houille destinée à la consommation du jour était pesée et mise par tas de 200 kil. Le chauffeur notait sur une ardoise l'heure de la mise en feu, l'heure de l'extinction et l'heure où il entamait chaque nouveau tas. Le reste du dernier tas était pesé avec soin.

Cinq fois par jour on observait la température de l'intérieur et celle de l'extérieur.

Dans ce but, 10 thermomètres, préalablement comparés, étaient

suspendus sous les lustres à 2 mètres au dessus du sol, hors de l'influence des murs et des bouches de chaleur.

La moyenne de ces 10 thermomètres donnait la température intérieure.

Deux thermomètres, placés, l'un dans une petite cour attenante au calorifère, l'autre sur le portail, donnaient la température extérieure.

Deux thermomètres suspendus à 2 mètres au dessus de deux bouches de chaleur servaient aux observations qui vont être décrites.

Six thermomètres appliqués contre la paroi intérieure des murs latéraux, et la face tournée contre ces murs, indiquaient la température de ces parois.

Enfin, deux thermomètres suspendus sous l'orgue à 8 ou 9 mètres d'élévation, et un troisième suspendu à la naissance de la coupole de la chapelle de la Vierge à 18 ou 20 mètres, servaient à étudier la répartition de la température à différentes hauteurs.

Tracé graphique des observations. — Pour suivre avec fruit et présenter nettement la marche des phénomènes observés, on a employé la méthode des représentations graphiques, qui parle davantage aux yeux. Cette méthode a été d'une extrême utilité, et l'on doit en recommander l'emploi aux personnes qui auraient à faire de pareilles observations.

Sur une bande de papier sans fin, quadrillé en millimètres, on a porté en abcisses les journées, subdivisées en heures, à l'echelle de 6 centimètres par vingt-quatre heures (planches n. 22 et 23, fig. 1). On a porté ensuite en ordonnées les températures à l'échelle de 5 millimètres par degré.

Au dessous de la ligne de zéro on a porté en ordonnées négatives la consommation par heure à l'échelle de 1 millimètre par kilog. La consommation est ainsi présentée sous forme d'un rectangle dont la hauteur donne la consommation par heure, uniformément répartie, et la surface la consommation totale du jour.

Enfin, un trait tiré à l'heure de la mise en feu et un autre à l'heure d'extinction délimitent la durée du chauffage. Des hachures différentes

sur ces diverses représentations les font ressortir, et l'on peut ainsi embrasser d'un coup d'œil sur le tableau :

1° La courbe des températures extérieures;

2° Celle de la température des parois intérieures;

3° Celle de la température moyenne intérieure;

4° Une autre courbe de température moyenne, dans laquelle celle prise à 2 mètres au dessus des bouches de chaleur entre pour un onzième (1), et qui nous servira tout à l'heure à faire ressortir un fait important;

5° La répartition et la durée du chauffage;

6° La consommation;

7° Enfin, quelques annotations qui indiquent les circonstances atmosphériques de chaque jour, et quelques faits importants à noter.

Un pareil tracé, tenu au courant jour par jour, évite bien des erreurs, de fausses interprétations et des tâtonnements.

Résultats obtenus et discussion de ces résultats. — Par une économie mal entendue, l'église n'avait été chauffée jusqu'alors que par intervalles irréguliers, et jamais d'une manière soutenue. La température intérieure n'avait jamais pu dépasser, de cette manière, 9 à 10 degrés, et descendait notablement pendant les gelées.

Le jeudi 16 novembre, jour où commença l'expertise, la température extérieure était de +3° à +4°, c'est-à-dire un peu au dessous de la moyenne de l'hiver, que l'on compte à Paris de +5°. La température intérieure était de +9°.

Du 17 au 27 novembre, dix jours de chauffage non interrompu de jour et de nuit, la température est arrivée à 18°.

Du 27 novembre au 6 décembre, l'église a été maintenue pendant neuf jours entre 15 et 16 degrés par un chauffage alternatif.

Enfin, du 6 décembre au 20 janvier, une température de 12 à 13°

---

(1) Cette proportion avait été fixée par les experts.

par différents froids a été maintenue en faisant varier les conditions du chauffage.

Examinons maintenant les principaux phénomènes à remarquer dans cette expérience.

Effet du chauffage continu. — Le fait le plus saillant et qui doit d'abord appeler notre attention est la réussite complète de cette idée émise par M. Léonce Thomas qu'en opérant avant tout un chauffage continu de jour et de nuit jusqu'à ce que la masse de l'air fût à une température soutenue de 16°, et que tous les murs fussent bien essuyés et réchauffés, on soutiendrait ensuite la température plus facilement et à moins de frais.

Si l'on se reporte au tableau, on verra que du dimanche 19 décembre au lundi 27, c'est-à-dire dans un espace de huit jours, la température de l'église est passée graduellement de 9° à 16° pleins; elle a même atteint, pendant les offices, le chiffre de 18°. Cette température est insupportable dans un vaisseau où l'on reste bien vêtu. Beaucoup de personnes se plaignaient de la chaleur et étaient obligées de sortir.

Durant ce laps de temps, la température extérieure s'est maintenue vers + 5° à + 6°.

La conséquence de cette méthode a été ce qu'en attendait son auteur, et durant les cinquante-six jours suivants le thermomètre a été facilement maintenu bien au dessus de ce qu'il accusait les années précédentes, et avec une notable économie.

Il est facile de comprendre, en effet, que, lorsque les 32 000^{mc}. d'air que contient l'église sont bien échauffés, lorsque les 5 800^{mq}. de surface de murs sont bien séchés, et que les 2 000^{mc}. de murs et piliers intérieurs sont portés à une température voisine de celle de l'air ambiant, la vitesse de refroidissement soit considérablement diminuée, et qu'il suffise désormais d'une faible somme de chaleur, qui, sans ce premier échauffement, eût été de suite absorbée et neutralisée.

M. Grouvelle a depuis appliqué cette méthode à la mise en train de tous les chauffages qu'il a exécutés depuis, et il en a retiré les mêmes fruits.

Chauffage par oscillation. — Un fait important, révélé par l'observation attentive de la marche de l'appareil, vient se ranger à côté du précédent.

Au lieu d'entretenir une température à peu près constante par un chauffage interrompu et repris chaque jour pendant un petit nombre d'heures, il est plus économique de faire osciller la température d'un ou deux degrés au dessus et au dessous de la moyenne que l'on veut obtenir, et cela par un chauffage repris et interrompu à de longs intervalles, dépendant naturellement de la rigueur du froid.

Des chiffres vont mettre cette vérité en relief.

Comparons la consommation par heure aux différentes époques où l'une et l'autre des deux méthodes a été suivie.

Epoques de chauffage continu.

Du 17 au 27 novembre, par heure.	36k.90	en moyenne 38k.35
Du 20 au 25 décembre, id.	38k.50	
Du 30 décembre au 7 janvier.	39k.67	

Epoques de chauffage à courts intervalles.

Du 27 novembre au 6 décembre.	40k.60	en moyenne 41k.02
Du 6 décembre au 19 décembre.	40k.60	
Du 25 décembre au 30 décembre.	41k.87	

On voit donc qu'il y a près de 3 kilog. d'économie par heure en faveur du chauffage continu, et qu'il y a avantage à s'en rapprocher le plus possible. Ceci tient à deux causes :

1° Dans la première heure de mise en feu, la consommation s'élève jusqu'à 50 kilog., alors même que le foyer n'est resté éteint que quelques heures ;

2° Comme il faut un certain temps avant que tous les tuyaux et carnaux de circulation aient atteint leur maximum de température, les bouches de chaleur ne donnent à leur tour un maximum d'effet utile qu'au bout d'un certain temps, qui n'est pas moindre de 3 jours.

Consultons, en effet, les deux courbes supérieures du tableau. Dans la formation de la première, avons-nous dit, la température à 2° au dessus des bouches de chaleur entre pour un onzième. La seconde courbe est l'expression pure et simple de la température du vaisseau. Or, à partir de l'instant de la mise en feu, on voit ces deux courbes se séparer graduellement jusqu'au moment où elles deviennent parallèles : c'est le moment où les bouches ont atteint leur maximum de puissance. Or ce parallélisme n'est atteint en général que vers le troisième jour, comme on peut le voir nettement au 17 novembre, aux 20 et 30 décembre, et au 8 janvier.

Il résulte de là que, si l'on se borne à un chauffage de quelques heures par jour, on consomme plus par heure et l'on n'atteint pas le maximum d'effet utile.

Si, de plus, on rapproche ce fait, qui résulte encore des expériences, et sur lequel je reviendrai tout à l'heure, à savoir que le refroidissement du vaisseau est assez lent pour une différence de températures intérieure et extérieure de 8 à 9°, ce qui a lieu pendant la moyenne de l'hiver, on en conclut naturellement que le mode de chauffage le plus économique avec l'appareil en question est d'entretenir le feu le plus long-temps possible, et de laisser refroidir aussi le plus long-temps possible, de manière à faire subir à la température une oscillation raisonnable de 2 à 3° autour de la moyenne.

Influence de la température extérieure.

En examinant la courbe aux différentes époques de froid, on remarquera deux points extrêmes assez curieux à connaître.

Maximum de puissance de l'appareil. — Le premier constate le maximum de puissance de l'appareil ; voici comment :

A mesure que les températures intérieure et extérieure s'écartent, la vitesse de refroidissement devient naturellement de plus en plus grande, et l'on comprend d'avance qu'il doit arriver un instant où cette vitesse devient telle que la chaleur fournie par l'appareil n'est plus capable de réparer les pertes, quelque vif et soutenu que soit le feu, et que cette

chaleur ne peut plus servir qu'à maintenir un écartement constant entre les deux températures en lutte. Jusque là, la température du vaisseau a pu être uniforme et indépendante de la température extérieure ; à partir de ce moment, elle en suit toutes les fluctuations.

Deux fois on a eu occasion de constater ainsi le maximum de puissance de l'appareil, le 21 décembre et le 2 janvier, jours où la température vint à baisser subitement en une nuit de 8 à 10°, et à produire ainsi une gelée de—5 à—6°. On remarque alors que la température intérieure a baissé aussi subitement de manière à se maintenir dans les deux cas, et durant toute la gelée, à peu près parallèle à la température extérieure, et supérieure à elle d'environ 16°. C'est donc là le maximum de puissance de l'appareil.

Lorsque pareille chose arrive, faut-il en conclure que l'appareil n'est pas assez puissant pour le local? Non, ce serait une opinion complétement erronée. C'est qu'en effet la température que nous recherchons, et qui nous plaît l'hiver, n'est que relative. Il a été constaté qu'il ne semblait jamais faire aussi chaud dans l'église que dans les deux circonstances précédentes, alors que la température du vaisseau était cependant au plus bas. On subissait, en effet, en y entrant, une différence brusque de 16° en plus, tandis que dans la moyenne de l'hiver cette différence est moitié moindre.

Réchauffement spontané de l'église. — Il existe sur la courbe un second point où le vaisseau semble encore suivre les fluctuations de la température extérieure, mais cette fois en se réchauffant et sans le secours du calorifère. A partir du 14 janvier, jour où l'on a cessé définitivement le feu, on voit la température de l'église baisser lentement jusqu'à ce qu'elle diffère de la moyenne extérieure d'environ 4 à 5°. Puis, comme cette moyenne extérieure monte lentement, on voit aussi la température intérieure suivre un mouvement ascendant faible, mais bien soutenu et bien caractérisé pendant trois jours, au bout desquels, le temps venant à se refroidir, elle commence aussi à descendre.

Nous n'entreprendrons pas ici d'expliquer ce phénomène, qui nous paraît du domaine d'une physique un peu délicate et sans utilité pour

notre sujet. Seulement il paraît tenir à une vitesse relative de refroidissement, dans laquelle l'échauffement préalable des murs et surfaces intérieurs doit jouer un rôle, les murs intérieurs rendant la chaleur qu'ils ont absorbée plus vite que les parois extérieures ne la perdent.

Du reste, sous un autre point de vue, l'observation de cette partie de la courbe peut nous être utile. Il est clair que, si l'on ne tient pas compte de ce réchauffement peu marqué, on en conclura cependant qu'à ce moment le refroidissement du vaisseau était au moins nul, malgré une différence de température avec l'extérieur d'environ 5 degrés.

Il existe donc en résumé deux points extrêmes de différence de températures extérieure et intérieure. Dans l'un, la vitesse de refroidissement arrive au maximum, et devient constante; dans l'autre, elle est sensiblement nulle. Pour l'appareil et le vaisseau en question, ces deux extrêmes ont lieu pour une différence de 16° d'une part, et de 5° de l'autre.

Extrême lenteur du refroidissement. — Entre ces deux états extrêmes des températures antagonistes, il en est un qui règne le plus généralement l'hiver, et il est intéressant de constater quelle est à peu près la vitesse de refroidissement à cette époque.

La moyenne de l'hiver est comptée à Paris de +5°. En supposant le vaisseau maintenu à 12°, il en résulte une différence de 7°. Or, on peut constater sur notre courbe qu'aux époques où cette différence avait lieu, la vitesse de refroidissement était assez faible pour qu'il n'ait pas fallu cesser le feu moins de cinq et six jours de suite pour obtenir un abaissement d'un degré.

Influence de la foule et de l'ouverture des portes. — Les églises sont sujettes à deux causes de refroidissement et de réchauffement accidentels qu'il était intéressant d'étudier : ce sont, d'une part, l'ouverture en grand de toutes les portes; et, de l'autre, l'affluence des fidèles. Or, il est fort remarquable combien peu ces deux causes ont d'action sur la température moyenne du vaisseau.

Nous avons dit plus haut que l'église Saint-Roch contient environ:

Les dimanches ordinaires. . . . 2000 à 4000 personnes
Les fêtes ordinaires . . . . . 4000—6000 »
Et les fêtes carillonnées. . . . . 6000—8000 »

On devrait s'attendre à voir la chaleur, développée par ces milliers de poêles à 33°, influencer d'une manière notable la température de l'edifice ; il n'en est rien. La température monte, il est vrai, pendant l'affluence, mais de 1 à 2 degrés seulement, et de cet échauffement il ne reste plus trace une demi-heure après l'écoulement de la foule. Cet effet est très saillant sur notre tableau : on y voit la courbe faire les dimanches et fêtes une espèce de pointe brusque qui embrasse juste la durée des offices. Elle reprend immédiatement après son allure primitive sans qu'elle en soit en rien altérée.

D'autre part, on peut examiner sur le tableau les heures d'ouverture des portes, savoir : le 10 décembre pendant trois quarts d'heure, le 15 décembre une heure et demie ; le 25 décembre pendant six heures ; et l'on ne verra rien d'extraordinaire à la courbe. Le vendredi 15 décembre, entre autres, jour où il n'y avait personne dans l'église, pour exécuter un nettoyage, on ouvrit en grand pendant une heure et demie les trois grandes portes du portail. On a suivi attentivement les deux thermomètres placés très près de ce dernier, et c'est à peine s'ils baissèrent d'une manière sensible ; aucun des autres ne bougea.

Répartition de la chaleur à différentes hauteurs. — Quiconque a eu la curiosité de vérifier l'énorme différence de température qui règne à diverses hauteurs dans un appartement ordinaire de 3 mètres à $3^{m}.50$ de hauteur devra s'attendre à voir cette différence prendre des proportions bien plus grandes dans un édifice de 18 mètres de hauteur moyenne. Aussi n'est-ce pas sans étonnement qu'il a été constaté que cette variation est relativement insensible, puisqu'elle n'a jamais dépassé un degré.

Deux thermomètres étaient suspendus sous l'orgue, à 8 ou 9 mètres du sol ; un troisième pendait à la corniche supérieure du dôme de la chapelle de la Vierge, à 18 ou 20 mètres. Ces trois thermomètres, con-

sultés de trois à cinq fois par jour, pendant vingt jours, accusaient constamment une température supérieure à la moyenne des dix thermomètres d'en bas de 0°.25, 0°.75, 1°, et jamais plus.

Ce fait tient-il à ce que le sommet du bâtiment baigne sans abri dans les couches élevées de l'atmosphère et rayonne librement dans l'espace, et que là par conséquent s'opère le refroidissement principal de l'ensemble? Une circonstance vient contredire cette hypothèse, ou du moins en diminuer la valeur : c'est l'existence d'un immense espace libre qui règne sur tout l'ensemble de l'édifice, espace qui contient cette formidable charpente, à laquelle on donne dans les anciennes cathédrales le nom caractéristique de *forêt*, et qui supporte la toiture. Cette immense couverture paralyse évidemment le rayonnement dans l'espace ainsi que l'action des vents.

Il faut plutôt chercher à expliquer l'homogénéité de la température en remarquant que l'air modérément chaud, disséminé par des bouches multipliées dans un espace d'ailleurs très élevé, a le temps de se mélanger à la masse avant d'arriver au sommet. Cette circonstance, on le voit, favorise singulièrement l'économie du chauffage en réduisant au minimum le refroidissement de la masse, et évitant le suréchauffement inutile de couches supérieures.

Disons d'ailleurs, en passant, que la lenteur du refroidissement est déjà favorisée par cette circonstance qu'il règne sur toute la surface des parois latérales une couche d'air assez épaisse, dont la température est constamment au dessous de celle du milieu d'une quantité assez notable, qui varie de 0°.75 à 1°.50. C'est ce qu'on voit au premier coup d'œil sur notre tableau, où la troisième courbe donne les fluctuations de cette température.

Circulation de l'air dans l'édifice. — Une autre circonstance contribue encore à régulariser la température : c'est la manière dont l'air est forcé de se diviser pour sortir de l'édifice.

Nous avons vu plus haut que la somme de toutes les fissures dont est percé le vitrage s'élève à l'énorme section de 14 mètres quarrés, placés à la hauteur moyenne de 11 mètres; mais il faut bien remarquer que la

majorité de ces fissures n'a que 3 à 4 millimètres de largeur, et le reste de 1 à 5 ou 6 centimètres. Or la résistance que l'air éprouve à traverser ces espaces si étroits est telle, qu'elle neutralise en grande partie la sortie de l'air ; de plus, elle la régularise.

Si les fissures n'offraient qu'une seule ouverture présentant leur section totale, tout chauffage serait impossible par l'énorme ventilation produite ; disséminées, au contraire, sur toute l'étendue de l'édifice, elles forcent l'air à se répandre et à suinter uniformément comme l'eau suinte uniformément à travers une matière poreuse, une couche de sable, par exemple. C'est donc là une circonstance très favorable et qu'il serait bon de produire, au besoin, si elle ne se présentait pas naturellement, puisqu'elle tend à donner aux mouvements de l'air une régularité analogue à celle qu'il atteint quand on le force à descendre.

Prises d'air intérieures. — Il est à regretter que M. Grouvelle n'ait pas employé plus hardiment le système des prises d'air à l'intérieur même de l'église. Il est évident que l'immensité du local est telle qu'il n'y aurait aucun inconvénient, au point de vue de l'hygiène, à reprendre l'air dans le vaisseau même pour le réchauffer de nouveau, en établissant ainsi une circulation continue. Ce système eût offert une notable économie dans la consommation du combustible. Mais, pour l'employer avec fruit et certitude de réussir, il faudrait multiplier considérablement ces prises, et leur donner la plus large section possible.

M. Grouvelle en a bien diposé quelques unes, mais simplement comme annexes aux prises extérieures ; elles sont très insuffisantes par elles-mêmes, et leur résultat est nul.

Facile propension de l'eau à circuler. — Ici doit prendre place l'observation d'un fait qui offre le plus haut intérêt dans la circulation d'eau chaude : nous voulons parler de l'extrême facilité avec laquelle on détermine l'eau à circuler.

La moindre différence de niveau et de température suffit pour établir un mouvement utilisable, même dans des tuyaux étroits. Nous trouvons ici une des premières applications qui aient été faites de ce principe. Sur la circulation principale du Calvaire, qui a 0^{m}.12 de diamètre, est em-

branché à angle droit un tuyau de 0m.08 et 23 mètres de longueur développée. Ce tuyau est replié sur lui-même, et vient rentrer dans le tuyau principal, à 0m.30 seulement de son point de départ. L'inclinaison de ce tuyau est très faible, et la circulation s'y effectue parfaitement.

Cette propriété remarquable de l'eau a reçu depuis, et tend à recevoir tous les jours, des applications fort utiles, et elle aura certainement une influence notable sur l'avenir du chauffage par circulation d'eau.

Déjà M. Grouvelle en a fait des applications importantes, et notamment au chauffage sur une très grande échelle de la prison Mazas.

MM. René Duvoir et compagnie en ont fait aussi l'application suivante à une prison cellulaire.

Les deux tuyaux d'aller et de retour sont côte à côte et règnent dans toute la longueur d'une rangée des cellules. Dans chaque cellule un poêle est situé au dessus de ces artères. Un tuyau très étroit s'embranche sur le tuyau d'aller, et pénètre directement dans le poêle jusque vers la partie supérieure; un autre petit tuyau fait communiquer la partie inférieure du poêle avec le tuyau de retour. Cette disposition si simple suffit pour établir rapidement la circulation dans le poêle, et le mouvement d'un robinet suffit pour déterminer ou supprimer le chauffage de telle ou telle cellule, sans influencer en rien le reste de la circulation. Une disposition analogue a été employée par les mêmes constructeurs à une partie du chauffage des salles d'attente à la gare du chemin de fer de Paris à Strasbourg.

Moyen simple de connaître la température moyenne d'un édifice. — Il n'est pas sans importance, lorsqu'il s'agit de régler le chauffage d'un vaste édifice, d'avoir un thermomètre unique indiquant sensiblement la moyenne température. On peut y parvenir par l'artifice suivant. Dans un milieu un peu considérable il doit se trouver nécessairement un ou plusieurs points dont les variations de température suivent sensiblement la variation moyenne de tout l'édifice. Il suffit donc de découvrir un de ces points et d'y placer un thermomètre pour avoir des indications suffisamment exactes. Or, lorsque l'on met en train pour la

première fois un chauffage un peu considérable, on a toujours intérêt à faire quelques expériences pour constater l'efficacité de l'appareil et en régler la marche. On pourra toujours, lors de ces premiers essais, distribuer dans le local un certain nombre de thermomètres, et il est très probable qu'il s'en trouvera au moins un qui remplira la condition précitée. C'est ce qui est arrivé à Saint-Roch pour le thermomètre n° 7, qui a toujours représenté sensiblement la moyenne des douze thermomètres répandus dans toutes les parties du local. Cet instrument était placé contre la menuiserie postérieure d'un petit buffet d'orgue qui se trouve au côté droit du chœur.

COEFFICIENT POUR LE CALCUL DE LA CONSOMMATION.

Dans le cas qui nous occupe la quantité totale de chaleur absorbée se compose :

1° De la chaleur perdue par les vitres et murailles ;

2° De celle perdue par les parois du fourneau et des carneaux de circulation, et celle absorbée par le sol ;

3° De celle entraînée par l'air sortant de l'édifice ;

4° De celle entraînée par la fumée.

Il faut encore ajouter, lors de la mise en train au commencement de l'hiver, la chaleur absorbée par le réchauffement de toute la masse. Cette quantité étant dépensée une fois pour toutes, on n'en tiendra pas compte dans les calculs.

Si l'on voulait se rendre compte rapidement de la dépense de combustible qu'entraînerait le chauffage d'un *édifice analogue* avec un *appareil de même genre*, on pourrait se servir du coefficient trouvé de la manière suivante :

A l'époque où l'appareil donne son maximum de puissance, la différence des températures intérieure et extérieure est de 16°, et la consommation par heure de 40 kil.

En faisant le calcul de la perte de chaleur à travers les murs et vitres

pour cette différence de 16° on trouve 192,866 unités (Voir le calcul aux notes).

La quantité fournie par les 40 kil. de combustible, en supposant la fumée abandonnée à 350°, est de 197,558 unités.

Le rapport de ces deux quantités est de 1,02. On voit donc qu'en calculant d'abord par les moyens ordinaires la quantité de chaleur perdue par les vitres et murailles, et multipliant ce chiffre par le coefficient 1,02, on tiendrait compte à la fois de la chaleur perdue par les trois autres causes signalées plus haut, et l'on aurait approximativement le chiffre de la consommation.

Ceci, nous le répétons, ne pourrait servir que si l'on se trouvait placé dans des conditions tout à fait analogues.

Disons, en passant, que ce rapport tend à prouver que le calcul, tel qu'on le fait ordinairement, exagère la chaleur perdue par les murs et vitres, car il est peu probable que la chaleur perdue par les autres causes ne soit que les deux centièmes de la première.

Chaleur transmise par unité de surface de chauffe.—On trouve par le calcul (Voir les notes.) que la quantité de chaleur qui passe par la surface de chauffe est de 1150 unités par mètre carré et par heure, pour une différence de température moyenne de 90°, ce qui équivaut à 12,75 unités pour une différence de 1°.

M. Péclet donne le chiffre de 1000 unités pour une différence de 80°, ce qui équivaut à 12,50 unités par degrés.

Comparaison de la surface de chauffe à la surface des murs et à la capacité de l'édifice. — Dans les appareils de chauffage on compare quelquefois la surface de chauffe à la surface des parois du local : ce rapport est ici de 165 à 6698 ou de $2^{mq}.5$ de chauffe à 111° pour 100 mètres carrés de parois.

Si l'on compare enfin la surface de chauffe à la capacité de l'édifice, on trouve $5^{mq}.35$ de surface à 111° pour 1000 mètres cubes de capacité.

Prix d'établissement d'entretien et de chauffage. — Les travaux pour l'établissement du calorifère de Saint-Roch ont commencé en novembre

1845, et ont été terminés en janvier 1846. C'était le premier appareil posé dans un édifice aussi ancien et aussi vaste.

Les travaux furent pénibles par l'impossibilité où l'on se trouvait de lever les dalles de l'église, ce qui eut interrompu le service. Il a donc fallu creuser souterrainement les conduits, et rouler les déblais dans les galeries pour les amener au jour. D'ailleurs, les plans fournis par la ville indiquaient sous les bas-côtés de la nef une série de caveaux qui n'existent point. Ces deux circonstances ont notablement élevé les frais d'établissement, qui se sont montés à 40,000 fr.

L'entretien général annuel peut être évalué à 800 fr. (chiffre fourni par M. Grouvelle).

Consommation. — Dans l'hiver de 1846 à 1847, du 21 novembre au 30 janvier, c'est-à-dire en 70 jours, on a consommé 34,500 kilog. de houille, soit 514 kilog. par jour.

Le chauffage à cette époque était mal réglé.

En 1850-51, postérieurement à nos expériences, en 120 jours de chauffage on a consommé 38,400 kilog., soit 320 kilog. par jour. Cet hiver était très doux.

Ces chiffres n'auraient de valeur bien significative qu'en les faisant accompagner de la température moyenne obtenue. — Malheureusement ce document nous manque.

Enfin, dans le cours de nos expériences, qui ont duré 64 jours de l'hiver 1848-49, la consommation totale s'est élevée à 32,320 kilog., soit 513 kilog. par jour.

Mais on peut voir sur la courbe de température qu'elle n'est jamais descendue au dessous de 11° à 12 degrés, et qu'elle a été maintenue assez long-temps de 14° à 18°. Cette température est de beaucoup supérieure à celle que l'on obtenait précédemment, puisqu'elle n'avait jamais dépassé 9 degrés.

CALORIFÈRE DE L'ÉGLISE DE PASSY.

Voici, en terminant, quelques renseignements que M. Grouvelle a bien voulu nous communiquer sur le chauffage qu'il a établi dans l'église de Passy. C'est un calorifère à air chauffé directement par un foyer.

La surface des murailles est de	1533 mètres carrés.
Celle des vitres	48 id.

La perte de chaleur a été comptée ainsi qu'il suit :

1533^{mq} de murs à 22 calories par mètre	33,726 calories.
48^{mq} de vitres à 75 calories par mètre	3,600 id.
Perte totale	37,326 calories.

Le calorifère présente 18 mètres carrés de surface de chauffe. On a compté sur 2000 unités de chaleur par mètre de cette surface.

On a garanti et réalisé une consommation de 100 kilog. de houille par jour pour une température moyenne de 14 degrés.

NOTES

Relatives à l'église de Saint-Roch.

DIMENSIONS PRINCIPALES.

Chaudière.	Longueur.	4^{m}.80	
	Diamètre.	0 .80	
	Surface de chauffe.		6^{mq}.50
Bouilleurs.	Longueur.	5 .25	
	Diamètre.	0 .30	
	Surface de 2 bouilleurs.		8^{mq}.90
	Surface de chauffe totale.		15 .40
Grille.	Surface de la grille.	0^{mq}.46	
Cheminée.	Diamètre intérieur à la base.	1^{m}.20	
	Hauteur.	26 .00	

SURFACES DE CHAUFFE DE L'AIR.

Circulation de la nef.

Tuyau principal.	Longueur développée.	168^{m}.450
	Diamètre extérieur.	0 .145

	Surface extérieure.		75mq.800
Tuyau additionnel.	Longueur développée.	90m.700	
	Diamètre extérieur.	0 .085	
	Surface extérieure.		24 .494

Circulation du Calvaire.

Longueur développée.	86 .000	
Diamètre extérieur.	0 .125	
Surface extérieure.		33 .540
Embranchements, renflements, poeles, etc.		31mq.019
Surface de chauffe totale.		164mq.853

BOUCHES DE CHALEUR.

Il y a 22 bouches de chaleur des dimensions suivantes :		
Hauteur maximum au dessus des tuyaux.	2m.50	
Hauteur minimum id.	0 .40	
Hauteur moyenne id.	1 .50	
Section vide pour une.	0mq.135	
Section vide pour les 22.		2 .970
Il y a de plus une bouche principale placée au point culminant sous l'orgue.		
Hauteur au dessus des tuyaux.	0m.40	
Section vide.		0 .172
Section totale des bouches.		3mq.142

ÉVALUATION DES FISSURES.

Nef et chœur.	25 fenêtres à 15m au dessus du sol.		0mq.2037	5mq.09
	14 fenêtres à 7m	id.	0 . 153	2 .14
Vierge et adoration.	7 fenêtres à 15m	id.	0 . 164	1 .15
			A reporter	8mq.38

	A reporter		$8^{mq}.38$
	8 fenêtres à 7^m au dessus du sol.	$0\ .188$	$1\ .50$
Calvaire.	10 fenêtres diverses à 9^m id.	$0\ .272$	$2\ .72$
	Total pour le vitrage.		$12^{mq}.60$
Trous de la voûte.	87 trous de $0^m.07$ de diamètre à 18^m au dessus du sol.		$0\ .55$
	Portes et divers à une hauteur moyenne de 5^m.		$1\ .00$
	Total des fissures à une hauteur moyenne de $11^m.20$		$14^{mq}.15$

VOLUME D'EAU EN CIRCULATION.

Chaudière.	$2^{mc}.268$	
Bouilleurs.	$0\ .740$	
Volume total se réchauffant.		$3^{mc}.008$
Volume en circulation dans la nef.	$2\ .925$	
Volume en circulation au calvaire.	$1\ .293$	
Volume total se refroidissant.		$4\ .218$
Volume total en circulation.		$7^{mc}.226$

CALCULS.

Consommation comparée à la surface de chauffe. — La consommation étant de 40^k à l'heure pour une différence de 16°, et la surface de chauffe de la chaudière étant de $15^{mq}.40$, il en résulte que par kilogramme de houille à brûler par heure, cette surface est de $0^{mq}.385$. D'après M. Péclet elle doit être de $0^{mq}.50$.

Température des tuyaux. — La température de sortie de l'eau, mesurée comme il a été expliqué dans le mémoire, est en moyenne de 120°

Sa température de rentrée est en moyenne de 102°

La différence est de 18°

La température moyenne est de 111°

Chaleur transmise par les tuyaux.—Quarante kilog. de houille produisent 40×7000 unités de chaleur, ou 280,000 unités. Mais pour les brûler il faut un volume d'air égal à $40 \times 18^{mc}.10$ ou 724^{mc}. Le chauffeur étant négligeant, la température de l'air brûlé est au moins de 350° (dans quatre expériences on a trouvé 380°, 235°, 380°, 205°). La capacité calorifique de l'air étant le quart de celle de l'eau, et le poids du mètre cube d'air étant de $1^{k}.3$ l'air, de combustion absorbe une quantité de chaleur développée égale à $724^{mc} \times 1^{k}.3 \times 0,25 \times 350°$ ou 82,442 unités. Il passe donc dans l'appareil 280 000—82442 ou 197 558 unités, dont une partie est encore perdue par les parois du fourneau.

Cette quantité de chaleur doit passer par les 165^{mq} de surface présentée par les tuyaux. — Chaque mètre laisse donc passer par heure 1197 unités.

L'air est versé dans l'église à environ 46 degrés.

En le supposant pris à 4°, sa température moyenne est de 21°. La différence de température avec celle des tuyaux est donc en moyenne de 111°—21° ou 90°.

CHALEUR PERDUE PAR LES VITRES ET LES MURAILLES.

La différence des températures intérieure et extérieure a été au maximum de 16° pendant les gelées, et la température de la face intérieure des murs étant toujours environ à 1° au dessous de celle du vaisseau, on peut admettre que la différence maximum est de 15°.

Murailles. — La surface des murs est de 5837 mètres cubes; leur épaisseur de $0^{m},50$.

En admettant pour coefficient de conductibilité de la pierre le nombre 0,8, et le nombre 9 pour le coefficient de transmission de la surface extérieure, la quantité de chaleur perdue par mètre et par heure est de

$$\frac{9.0,8.15}{9.0,50+0,8} = 23,58 \text{ unités.}$$

Et la quantité totale transmise par les murs est de $23,58 \times 5837$ ou 137636 unités.

Vitres. — La surface des vitres est de 860^{mq}.

En admettant que par une vitre ordinaire il passe 3,7 unités par mètre et par heure pour une différence de 1°, la transmission totale sera de 860 × 3,7 × 15 ou 55 230 unités.

Et la totalité perdue par les murs et les vitres réunis est de 192866 unités.

Chaleur perdue par le sol, les carneaux, le fourneau et l'air à sa sortie. — Puisque la houille brûlée dans ces conditions développait une quantité de chaleur égale à 197,558 unités, la chaleur perdue par le sol, les carneaux, le fourneau et l'air à sa sortie, serait de 197,558—192,866 ou 4692 unités, quantité excessivement faible, ainsi qu'il a été dit plus haut, et qui nous fait penser que la transmission admise pour les murs et les vitres n'est pas applicable dans ce cas.

LÉGENDE EXPLICATIVE DES PLANCHES.

Les chiffres marqués sur le plan (planche n. 23, fig. 2) indiquent la place des thermomètres, qui etaient disposés de la manière suivante :

1, 4, 8, 11, 12, 14, à deux mètres au dessus du sol contre le mur et la face tournée vers la paroi.

2, 3, 5, 6, 7, 13, 15, 16, à deux mètres au dessus du sol, soit suspendus sous des lustres, soit contre des boiseries, loin de l'influence des bouches et des murailles.

17, 18, 19, suspendus sous l'orgue à 8 ou 10 mètres de hauteur.

20 suspendu à la naissance de la coupole de la chapelle de la Vierge, à 18 ou 20 mètres d'élévation.

9 et 10, à deux mètres au dessus d'une bouche de chaleur.

Outre ces thermomètres il y en avait deux à l'extérieur : l'un sur le portail et l'autre dans une petite cour à l'entrée du caveau du calorifère.

Pour les courbes de température (planches n. 22 et 23, fig. 1) :

1° La courbe inférieure indique les températures du dehors ;

2° La suivante indique celle des parois intérieures ;

3° La troisième indique la température moyenne intérieure ;

4° La dernière indique une température moyenne où l'on a fait entrer pour un onzième celle des thermomètres placés à 2^{m} au dessus des bouches de chaleur.

Les parties hachées très noir au dessous de la ligne de 0 représentent la consommation de houille, celles hachées au dessus de la ligne de 0 représentent la durée et les interruptions du chauffage. Elles sont limitées par un trait vertical tiré à l'heure de l'allumage et à celle de l'extinction.

Enfin les parties hachées plus serrées indiquent l'ouverture en grand de toutes les portes, et la durée de cette ouverture.

Note sur les Chemins de fer suisses.

Par M. SAUTTER.

Depuis 1849 que la question des chemins de fer a été mise à l'étude en Suisse, elle est encore loin d'être résolue ; mais des travaux intéressants ont été faits, et beaucoup de documents importants recueillis et mis en ordre. Ces documents sont de nature à rectifier des idées fausses trop généralement répandues en France et même en Suisse sur les obstacles à surmonter pour l'exécution de ces chemins de fer, et sur les services qu'ils sont appelés à rendre. Presque tous les étrangers ne connaissent de la Suisse que la région des Alpes, où l'Europe envoie chaque année ses touristes ; aussi croit-on généralement que la nature, en accordant à ce beau pays les sites pittoresques, lui a refusé les communications faciles. Mais pour qui connaît les cantons du nord-est, pour qui a parcouru les riches, larges et populeuses vallées de l'Aar, de la Limmat et du lac de Zurich ; pour qui s'est rendu compte de la grande activité commerciale et industrielle des villes de Bâle, Zurich, Shaffouse, Saint-Gall, Appenzell, et des nombreux rapports qui les unissent entre elles et aux pays voisins ; pour qui sait enfin à quel point des moyens de transports rapides et économiques développent l'industrie et la richesse d'un pays, la question de l'établissement d'un réseau de chemins de fer en Suisse paraît tout au moins digne d'un sérieux examen. A un point de vue plus général, cette étude, faite à l'aide de cartes exactes, de statistiques complètes, et avec le concours de l'illustre Stephenson, les discussions qu'elle a provoquées sur le meilleur mode de tracé en pays de montagnes, et sur l'importante question des pentes, présentent un grand intérêt. Quelle que soit la solution qui intervienne, les travaux qui l'auront préparée resteront comme documents à consulter non seulement par un Suisse désireux de connaître la statistique de son pays, mais par tout ingénieur ou tout administrateur chargé de l'étude et des avant-projets d'un chemin de fer.

En décembre 1849, l'Assemblée fédérale décida que des experts seraient nommés, qui donneraient leur avis sur l'établissement d'un réseau de chemins de fer en Suisse. Le conseil fédéral voulut que le nom seul de ces experts fût une autorité, et qu'ils ne pussent être influencés par aucune autre considération que l'intérêt de la Suisse; elle choisit Robert Stephenson. Un article du décret qui les nomme leur donne pour mission « de déterminer les directions à donner aux chemins de fer pour le plus grand avantage de la Suisse, en ayant tout particulièrement égard aux lignes les plus productives, les plus favorables à la circulation intérieure et au transit, ainsi qu'à la richesse du pays. »

Ce décret désignait en même temps à l'attention des experts un certain nombre de lignes, et parmi elles celles qui traversent les Alpes par le Puckmanier.

Une étude approfondie de ces différentes lignes avait été faite par les ingénieurs suisses avant l'arrivée de Stephenson. Grâce aux excellentes cartes topographiques que la plupart des cantons possèdent, cette étude, embrassant 1200 kilomètres environ de chemins de fer, a pu être terminée en huit mois, et au prix très faible de 50 fr. le kilomètre. Elle comprend non seulement le tracé sur la carte, le nivellement du profil en long, le calcul approximatif des frais de terrassement et de travaux d'art, mais encore un grand nombre de renseignements statistiques sur l'importance de la circulation, soit des voyageurs, soit des marchandises.

Les projets ainsi préparés ont été soumis à l'appréciation de Stephenson. Il a trouvé que les ingénieurs s'étaient trop préoccupés de la question des pentes et en avaient fixé le minimum trop bas; il propose de les porter à 16 et 17 millimètres par mètre. Dans les chemins à marchandises destinés à être parcourus par des convois à petite vitesse, et dans lesquels le travail qui doit être développé par la machine est proportionnel seulement au poids qu'elle doit traîner, il est indispensable de n'avoir que des pentes faibles. Mais dans un chemin à voyageurs, à grande vitesse, la résistance de l'air, qui croit comme le carré de la vitesse, devient un élément important du travail négatif exercé par le con-

voi; la résistance diminuant, une partie du travail de la machine, celle qui faisait équilibre à cette résistance, devient sans emploi, et peut servir ou à traîner un plus grand nombre de wagons, ou à traîner le même nombre de wagons sur une plus forte pente. En d'autres termes, la formule qui exprime le travail résistant d'un convoi renferme trois variables : le poids de ce convoi, la pente du chemin et la vitesse; ce travail doit être égal au travail positif et constant de la locomotive. Si donc l'une des variables diminue, il faut pour que la somme reste constante que l'autre variable augmente, et la même machine peut traîner le même poids sur une plus forte pente, à la condition que la vitesse sera moindre.

Stephenson pense donc que dans un pays où la circulation des voyageurs sera beaucoup plus importante que celle des marchandises il ne faut pas reculer devant des pentes de 16 à 17 millimètres, et qu'elles n'auront d'autre effet que de ralentir la marche du convoi.

Il conseille en outre, lorsqu'il s'agira de franchir une montagne pour passer d'une vallée dans une autre, d'éviter les longs tunnels, et d'établir plutôt des plans inclinés desservis par des machines fixes ou des plans automoteurs, sur lesquels les convois seraient remorqués par des wagons chargés d'eau. La pente de ces plans ne devrait pas dépasser 35 millimètres par mètre.

Enfin il recommande de construire toutes les lignes sans exception avec une voie simple, qui, avec une exploitation judicieuse et l'emploi du télégraphe électrique, lui paraît tout à fait suffisante.

En adoptant ces principes on a pu modifier considérablement les projets et abaisser le chiffre des premières évaluations.

Il restait à choisir, entre les lignes proposées, celles qui par leur position, l'importance des pays qu'elles devaient traverser et des points qu'elles devaient unir, ou bien, par l'économie de leur construction, mériteraient de fixer les premières l'attention du gouvernement et la faveur des capitalistes.

Stephenson s'est arrêté aux suivantes :

Une grande ligne traversant toute la Suisse du lac de Constance à

Genève, en passant par Zurich, la vallée de la Limmat, la vallée de l'Aar, Aarau, Soleure, Yverdon, Morges et Genève.

Sur cette ligne, artère principale de la Suisse, viendraient se greffe :

Un chemin sur Bâle, destiné à unir la Suisse aux chemins français et allemands;

Un chemin sur Berne, la ville fédérale;

Un chemin sur Lucerne;

Un chemin qui, partant du lac de Constance, remonterait la vallée du Rhin jusqu'à Coire, au centre des Grisons, et pourrait être plus tard prolongé à travers les Alpes par le Lukmanier jusque dans la Lombardie. Ce dernier passage présente de trop grandes difficultés, et le revenu du chemin est trop incertain pour que la Suisse puisse songer à l'entreprendre maintenant, et sans le concours des pays voisins, à qui il profitera plus qu'à elle;

Enfin, deux lignes moins importantes, mais destinées à relier à l'artère principale les deux centres de population de Thunn et de Shaffouse, et une dernière (pour le canton du Tessin) de Biasco à Locarno.

La ligne principale longe pendant une partie de son parcours les lacs de Bienne, de Neufchâtel et de Genève. Stephenson n'est nullement d'avis de faire concurrence à ces routes si vastes et si commodes ouvertes par la nature. Cette opinion est d'autant plus fondée, que le conseil fédéral est à la veille d'adopter un projet depuis long-temps connu et étudié en Suisse, sous le titre de *Correction des eaux du Jura*, projet qui aurait pour résultat d'abaisser de près de 3 mètres le niveau des lacs de Neufchâtel et de Bienne, de rendre ainsi à l'agriculture une grande surface de terrains marécageux, et enfin, ce qui touche surtout à la question dont nous nous occupons, d'établir entre les deux lacs, ainsi qu'entre celui de Bienne et l'Aar, une communication navigable.

Le chemin de fer pourrait donc s'arrêter à Soleure, reprendre à Yverdon et s'arrêter de nouveau à Morges, d'où les bateaux à vapeur conduiraient le voyageur jusqu'à Genève.

De tous ces chemins, le plus difficile est celui d'Olten à Bâle; il né-

cessiterait la construction d'un souterrain (le souterrain du Hauenstein) de 2400m de longueur, précédé et suivi de plusieurs plans inclinés. Ces difficultés ont engagé à étudier un autre tracé par les vallées de la Reuss et du Rhin. Ce tracé abrégerait à la vérité le trajet entre Zurich et Bâle, mais il allongerait celui entre Bâle et les cantons de l'ouest. En outre il se trouverait, par sa position sur les rives du Rhin, exposé à toutes les chances d'une guerre de frontière. Aussi Stephenson n'hésite-t-il pas à se prononcer pour le tracé par Otten.

Il est facile, à première vue, de comprendre les avantages que la Suisse retirerait de la construction de ce réseau, qui verserait sur toute sa surface les étrangers amenés au lac de Constance par les chemins de fer allemands, à Bâle par les chemins de Strasbourg et de Francfort, qui faciliterait l'importation des céréales d'Allemagne et l'exportation des produits manufacturés des cantons de l'ouest; mais il ne suffit pas de constater ces avantages, il faut voir s'ils sont en rapport avec les frais au prix desquels ils seraient achetés. Deux nouveaux experts, MM. Gergy (de Bâle) et Ziégler (de Wenterthur) ont été chargés d'examiner la question sous cet autre point de vue.

Les deux nouveaux experts ont pris pour base de leurs travaux le réseau proposé par Stephenson. Passant successivement en revue toutes les lignes qui le composent, ils ont étudié pour chacune : 1° les frais de construction, 2° le mouvement des voyageurs et des marchandises, 3° les frais d'exploitation, 4° le produit net.

Voici en quelques mots les résultats auxquels ils sont arrivés.

La dépense totale pour une longueur cumulée de 650 kilomètres de lignes avec voie simple serait de 102,123,000 fr., soit, en moyenne, 157,112 fr. par kilomètre.

En admettant que la circulation des voyageurs et des marchandises reste telle qu'elle est aujourd'hui, sans aucune augmentation, et en adoptant le tarif de 5°.8 par kilomètre et par voyageur (y compris les bagages), et de 16 c. par kilomètre et par tonne de marchandise, on voit que le revenu brut de tous ces chemins réunis serait de 6,374,000 francs, soit de 9,778 fr. par kilomètre.

Les frais d'exploitation ont été calculés d'après le nombre probable de convois qui parcourront chaque année les lignes et d'après le tableau suivant, résultant de nombreuses expériences faites en Allemagne.

Nombre de convois par arrondissement.	Frais d'administration.	Frais d'entretien.	Frais de transport.	Total.
de 1500 à 2000	0.23	0,87	0.17	2 27
de 2000 à 3000	0.38	0.72	1.30	2.20
de 3000 à 4000	0.16	0.67	1.35	2.18
de 4000 à 5000	0.15	0.64	1 38	2.17
de 5000 à 6000	0.14	0,62	1.40	2.16

Les frais ainsi calculés seraient de 5,000 fr. par kilomètre, de 3,648,825 fr. pour toute la ligne.

Enfin le revenu net serait de 4,190 fr. par kilomètre ; de 2,725,685 francs pour toute la ligne ; ce qui représenterait 2 fr. 67 c. p. 100 du capital employé.

Ce résultat n'est pas brillant, mais il ne faut pas perdre de vue qu'il représente le rendement moyen de la ligne entière, et que certaines parties, celle de Lyss à Soleure, et de Zurich à Rorschach, rendraient plus de 4 p. 100, tandis que le revenu de plusieurs autres, celle de Berne à Thun, et d'Aarburg à Lucerne, par exemple, ne dépasserait pas un et demi p. 100.

De plus, les experts n'ont supposé aucune augmentation du transport actuel, tandis que l'exemple de tous les chemins de fer prouve dans quelle proportion considérable la circulation s'accroît par suite de leur établissement.

Quoi qu'il en soit, en présence des chiffres que nous venons de rapporter, on peut affirmer que les chemins de fer suisses, au moins pendant les premières années de leur création, ne seront pas pour l'état, ou pour les particuliers qui les construiront, une source directe de revenus ; loin de là, ils exigeront sans doute de la part du gouvernement de grands quoique utiles sacrifices. Comment y pourvoira-t-il? Comment se fera la répartition de ces dépenses entre des cantons qui parti-

ciperont inégalement aux revenus? Questions difficiles à résoudre dans un pays où les attributions du pouvoir fédéral qui représente l'intérêt commun de la Suisse sont faibles à voter, des attributions du pouvoir cantonnal qui représente l'intérêt particulier des vingt-deux états qui la composent.

Les experts pensent que le meilleur mode de contribution du gouvernement serait une garantie d'intérêts, qu'ils fixent à 3 1/2 p. 100.

Le revenu étant de 2 1/2 p. 100, la perte annuelle serait de 1 p. 100. Elle serait supportée pour un tiers par la confédération, pour deux tiers par les cantons intéressés.

L'un des experts propose que l'état construise et exploite lui-même, en émettant des obligations qu'il se réserverait le droit de racheter au pair au bout de 50 ans.

L'autre expert pense qu'il faudrait mieux concéder les lignes à des compagnies pour un certain temps, à l'expiration duquel l'état aurait le droit ou de prolonger la concession, ou de racheter le chemin pour sa valeur présente.

Le conseil fédéral, appelé à se prononcer sur ces rapports, a adopté les conclusions du premier, et a rédigé un projet de décret dans ce sens. Ce décret va être soumis à une commission nommée par l'assemblée fédérale, qui fera son rapport; après quoi l'assemblée elle-même décidera.

Voilà où en est aujourd'hui la question. Quelle solution définitive recevra-t-elle? trouvera-t-elle auprès du pays, auprès des capitalistes suisses, la faveur que le gouvernement paraît disposé à lui accorder? Elle a dès aujourd'hui des partisans et des adversaires, mais le nombre des indifférents est plus grand encore : c'est que la question n'est pas mûre; c'est qu'en la posant, le gouvernement ne formule pas le vœu général de la Suisse, mais prend l'initiative. Il faut que le pays s'assimile ces idées nouvelles; il faut, avant d'entreprendre une œuvre pour laquelle on exige de lui de si grands sacrifices, et qui, de l'aveu même de ceux qui la lui proposent, doit apporter dans son organisation intérieure de si importants changements, qu'il ait longuement et mûrement pesé la

valeur des arguments mis en avant pour le convaincre; en un mot, il faut que l'opinion publique se forme, et il ne suffit pas pour cela d'un rapport d'experts, ou même d'une décision de l'assemblée fédérale.

De la part de plusieurs cantons, il faut s'attendre à plus que de l'indifférence, à une hostilité sérieuse et motivée. En effet, s'il est certain que la création des chemins de fer augmenterait la prospérité du pays pris dans son ensemble, il n'est pas moins certain que ces avantages ne seraient pas égaux pour tous les cantons, mais que, les uns se développant outre mesure, les autres restant stationnaires, leur importance relative, et le rôle que chacun d'eux joue dans la confédération, seront profondément modifiés. Ce sera une perturbation analogue à celle qui se produirait en Europe si les douanes étaient subitement supprimées. Certaines industries ne pourront résister à la concurrence : la valeur de bien des choses, et par suite le chiffre de bien des fortunes, sera changé. Pour ne citer qu'un exemple, dans le canton de Berne, qui est presque exclusivement agricole, l'introduction des céréales d'Allemagne abaissera la valeur des terres. Croit-on que les propriétaires bernois soient disposés à la favoriser, qu'ils votent la garantie d'intérêt qu'on leur demande en faveur d'une œuvre dont Zurich, Saint-Gall, profiteront de suite, mais dont ils ne profiteront, eux, qu'à la condition de changer complétement l'industrie et les mœurs de leur pays?

Il ne faut pas oublier non plus de compter au nombre des adversaires des chemins de fer ceux que les routes enrichissent. Ainsi Bâle-Campagne s'opposera de toutes ses forces à la construction du chemin de Zurich à Bâle, parce que, si Bâle cessait d'être tête de ligne, les marchandises que le chemin de Strasbourg y amène, et qui traversent le canton à petites journées pour se répandre dans la Suisse, iraient directement à leur destination.

Enfin il est beaucoup de personnes qui, par des considérations d'un ordre public plus élevé, redoutent pour la Suisse l'établissement des chemins de fer, ou tout au moins s'en défient. Elles s'effraient du changement que des rapports trop multipliés avec l'étranger apporteront

dans les mœurs du pays, du développement que l'industrie va prendre, et des vices, des misères, qu'elle entraînera après elle; elles combattent enfin la tendance à la centralisation dans un pays composé d'éléments aussi nombreux, aussi dissemblables, que la Suisse.

Malgré tous ces obstacles, il est probable que les chemins de fer triompheront tôt ou tard, parce que la Suisse, pays intelligent et actif, ne peut rester long-temps en arrière de ses voisins, et parce qu'on peut déplorer le mouvement trop rapide et le développement exagéré de l'industrie, mais non s'y opposer. Mais puisque l'entreprise n'a pas un avenir assez brillant pour attirer les capitalistes, il faut pour qu'elle réussisse que le pays l'adopte comme une œuvre nationale; il faut surtout que non seulement le gouvernement fédéral, mais encore les gouvernements de tous les cantons intéressés, présentent assez de stabilité, inspirent assez de confiance, pour que la garantie d'intérêt qu'ils donneront attire les capitaux étrangers, sans le concours desquels il est impossible que l'œuvre s'accomplisse.

Note sur les chemins de fer en Suisse,

Par M. BRIDEL.

Nouveau mode de traction sur les plans inclinés proposé par M. Stephenson

La plupart des lignes dont il a été question dans la note de M. Sautter sont tracées dans les conditions ordinaires des chemins à grande vitesse. Ainsi, dans toute sa longueur, qui est de 326 kilomètres, la grande artère de Genève à Zurich ne présente que 17 kilomètres de rampes de 5 à 10 millimètres, fractionnées en parties assez courtes pour qu'elles puissent être franchies par les convois en vertu de leur vitesse acquise. Le prolongement de cette ligne de Zurich à Rorschach, sur le lac de Constance, d'une longueur de 99 kilomètres, est un peu plus accidenté ; néanmoins les rampes n'y dépassent pas 14 millimètres, et sont concentrées sur une longueur de 45 kilomètres, ce qui rendra facile l'emploi des machines de renfort.

Les seuls travaux importants sur ces 425 kilomètres sont six tunnels de 640, 520, 480, 120, 90 et 1080 mètres de longueur. Ceux que l'on rencontre sur la ligne de Strasbourg entre Paris et Château-Thierry, pour un parcours de 94 kilomètres, ont ensemble 2200 mètres de longueur, soit 680 de moins que les précédents.

Parmi les lignes secondaires, il en est quelques unes dont le profil est moins favorable que le précédent ; néanmoins, sur aucune d'elles on ne rencontre de rampes supérieures à 15 millimètres, si ce n'est sur celle d'Arburg à Lucerne, et surtout de Bâle à Olten.

Nous ne nous occuperons ici que de la seconde de ces deux lignes, qui présente des difficultés bien plus grandes que la première.

La cote de la gare de Bâle, déterminée par la nécessité où l'on se trouve de raccorder la ligne projetée avec le chemin de Strasbourg à Bâle et le réseau Badois, est de 275 mètres au dessus du niveau

de la mer. Le point le moins élevé de la chaîne du Jura, qu'il s'agit de franchir, est à 760 mètres au dessus du niveau de la mer; il s'agissait donc de racheter une différence de niveau de 485 mètres sur une distance d'environ 30 kilomètres.

Un premier tracé, dans lequel on avait admis la pente maximum de 15 millimètres, nécessitait le percement d'un tunnel de 3500 mètres de longueur, avec puits dont la profondeur allait jusqu'à 220 mètres. Ce tunnel était évalué à 7,000,000 de francs. Les travaux aux abords du tunnel présentaient de grandes difficultés, et l'on rencontrait la pente maximum de 15 millimètres sur la majeure partie de la ligne.

Le nouveau tracé proposé par M. Stephenson diffère essentiellement du précédent par l'emploi de plans inclinés d'un genre particulier. Dans ce tracé, la ligne partant de Bâle s'élève progressivement par des rampes de 0 à 10 millimètres à une hauteur de 100 mètres dans un parcours de 20 kilomètres. Sur les 7 kilomètres suivants, les rampes de 10 à 16 millimètres rachètent une hauteur de 100 mètres; puis vient un plan incliné à 30 millimètres, long de 2800 mètres, qui aboutit au point le plus élevé de la ligne, à 284 mètres au dessus du point de départ. Le tunnel établi en ce point n'a plus que de 2400 mètres de longueur; les puits les plus profonds ont 170 mètres. Ce tunnel a une pente de 25 millimètres; il est suivi d'un troisième plan, incliné à 35 millimètres, long de 2200 mètres. A partir de ce point, la ligne est de nouveau accessible aux locomotives.

L'économie résultant de l'adoption du tracé de M. Stephenson est évaluée à 4,000,000 fr., soit 111,000 fr. par kilomètre, représentant une recette d'environ 4,000 fr. par kilomètre (la recette brute de cette ligne est évaluée à 20,000 fr. par kilomètre).

Voici maintenant quelques détails sur le mode de traction aussi simple qu'original proposé par M. Stephenson.

Partout où les rampes n'excèdent pas 16 millimètres par mètre, le service serait fait par des machines mixtes seulement. Sur les trois plans inclinés à 30, 25 et 35 millimètres, on ferait usage du système automoteur combiné avec l'emploi des locomotives. A cet effet, on con-

struirait, au point le plus élevé de la ligne, des réservoirs qui recevraient l'eau du ruisseau que l'on trouve en ce point, et qui, dans les plus grandes sécheresses, fournit environ 100 mètres cubes d'eau par heure.

Les plans inclinés seraient établis, comme cela se fait ordinairement en Angleterre, avec trois files de rails dans leur partie supérieure, quatre en leur milieu, sur environ 300 mètres, et enfin avec deux seulement dans leur partie inférieure. Une courte voie de garage serait en outre établie au pied de chaque plan incliné.

Sur cette voie de garage on placerait un certain nombre de wagons, portant chacun un réservoir étanche de 8 mètres cubes, attelés à l'extrémité du câble. Ce câble suivrait la voie sur laquelle le premier convoi devrait monter; puis, après avoir passé sur la gorge d'une poulie à axe vertical établie au sommet du plan, serait attaché à un nombre égal de wagons-réservoirs placés au sommet du plan incliné.

Ces derniers wagons étant remplis d'eau, tandis que ceux du bas seraient vides, le convoi montant arriverait machine en tête. Dès qu'il aurait dépassé les aiguilles de la voie de garage, on mettrait en mouvement les wagons à eau pleins en desserrant leurs freins. Ceux-ci entraîneraient le câble, et par suite les wagons vides garés au pied du plan, lesquels viendraient tamponner l'arrière du train et le pousseraient ainsi jusqu'au haut du plan incliné. De cette manière ils viendraient en aide à la machine, qui continuerait à fonctionner sans qu'il ait été nécessaire d'arrêter pour attacher le câble.

On pourrait utiliser comme frein les wagons pleins arrivés ainsi au pied du plan incliné, en les faisant remonter par les trains descendants, ce qui procurerait une économie notable d'eau, ou bien l'on pourrait simplement les vider.

Quand un convoi doit franchir une suite de plans inclinés construits dans ce système, il est repris, à chaque palier qui sépare ces plans, par un nouvel appareil moteur, qui est dirigé par les mêmes hommes qui l'ont déjà accompagné sur le plan incliné qui précède. Le personnel se compose donc de deux hommes pour chaque plan, et de deux hommes au

pied du plan incliné inférieur. Entre le passage des trains, ces hommes sont occupés à l'entretien de la voie, des poulies, des câbles et du matériel.

Ce mode de traction mixte, qui paraît au premier abord assez compliqué, fonctionne avec succès sur une ligne anglaise du comté d'York, qui ne transporte que des voyageurs.

Les frais d'établissement de 7 1/2 kilomètres de plans automoteurs sont estimés par M. Stephenson comme suit :

Câbles en fil de fer, poulies, réservoirs. . . .	200,000 fr.
36 wagons à eau.	150,000
Total. . . .	350,000 fr.

Les frais spéciaux d'exploitation seraient, également d'après les indications de M. Stephenson, les suivants :

Salaire de 12 hommes pour le service des plans inclinés, annuellement	10,000 fr.
Usure des câbles, annuellement un tiers de leurs frais d'acquisition	15,000
Usure des poulies et wagons, à 1,200 fr. par kilomètre.	9,000
Total. . . .	34,000 fr.

D'après les relevés statistiques, la circulation des voyageurs et des marchandises exigerait 14 trains par jour, ou 5000 par an, parcourant $5000 \times 36 = 180{,}000$ kilomètres. Les frais spéciaux d'exploitation résultant de l'emploi des plans inclinés seraient donc par kilomètre de parcours

$$\frac{34{,}000}{180{,}000} = 0 \text{ fr. } 19$$

NOTE

SUR LES

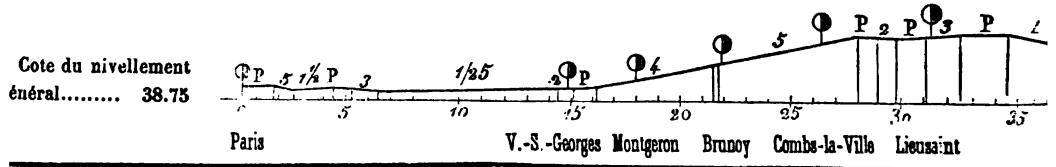
Résultats relatifs à l'évaluation de la puissance et des consommations produites par les machines locomotives mixtes employées au remorquage des trains de voyageurs entre Paris et Montereau sur le chemin de fer de Paris à Lyon,

PAR M. JULES POIRÉE,

Ingénieur des ponts et chaussées.

Résultats relatifs à l'évaluation de la puissance et des consommations produites par les mach

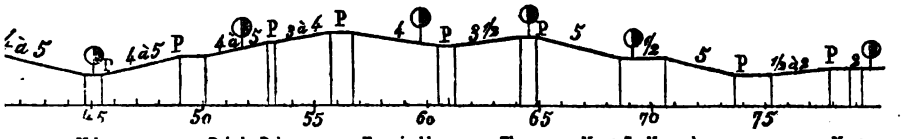
Nota. La distance de Paris à Montereau est de 79 kilomètres; la voie est très accidentée dans cette p
le profil ci-dessous. Le remorqueur



DATE des EXPÉRIENCES.	DÉSIGNATION DES TRAINS.	Durée en secondes du trajet, déduction faite des arrêts aux stations.	Temps de la marche pendant lequel la vapeur n'a pas agi.	Temps pendant lequel la vapeur a fonctionné		Vitesse moyenne de marche en kilom. à l'heure.	Poids total du train remorqué	Consommation totale en kilogram	
				en secondes	en heures et fractions décimales de l'heure.			en coke.	en
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14 octobre 1851.	Train direct de Paris à Montereau. . .	6360	538	5822	1.61	45	116[t]		
	Train omnibus de Montereau à Paris.	7020	1470	5550	1.54	41	90		
	Pour les deux trains ensemble.	13380	2008	11372	3.15			k. 1822	
18 octobre (vent presque nul).	Train direct de Paris à Montereau. . .	6360	660	5700	1.58	45	135		
	Train omnibus de Montereau à Paris.	7020	2020	5000	1.39	41	82		
	Pour les deux trains ensemble.	13380	2680	10700	2.97			1424	
22 octobre.	Train direct de Paris à Montereau. . .	6360	530	5830	1.62	45	119		
	Train direct de Montereau à Paris. . .	6240	576	5664	1.57	46	83		
	Pour les deux trains ensemble.	12600	1106	11494	3.19			1584	
4 novembre.	Train direct de Paris à Montereau. . .	5940	390	5550	1.54	48	110		
	Train omnibus de Montereau à Paris.	8123	1505	6618	1.84	35	98		
	Pour les deux trains ensemble.	14063	1893	12168	3.38			1936	
5 novembre (vent de côté assez fort.	Train omnibus de Paris à Montereau.	7680	1360	6320	1.75	37	84		
	Train direct de Montereau à Paris. . .	6180	670	5510	1.53	45	77		
	Pour les deux trains ensemble.	13860	2030	11830	3.28			1625	

locomotives employées au remorquage des trains de voyageurs entre Paris et Montereau.

de la ligne, et présente plusieurs pentes et contre pentes de 0,004 à 0,005 par mètre, comme le montre fait avec les machines mixtes du chemin.



Cote du nivellemen général..... 55m.0

Consommation par heure et par cheval en kilogrammes.		Travail pour le remorquage du train seul (donné par le dynamomètre)	Nombre de chevaux en moyenne pour la traction du train remorqué	Consommation par heure et par cheval pour le train remorqué.		Travail pour la traction du train brut, non compris les résistances passives de la machine (approximativement).	Nombre de chevaux (train brut).	Consommation par heure et par cheval pour le train brut.		Travail total pour la traction du train, c'est-à-dire comprenant les résistances passives de la machine (approximativement).	Nombre de chevaux (force nominale).	Consommation par heure et par cheval nominal.	
en coke.	en eau.			en coke.	en eau.			en coke.	en eau.			en coke.	en eau.
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		k. m. 77 517 760 62 873 665	177 151										
k. 578	k. 4790	140 391 365	164	k. 3.52	k. 29	219 000 000	256	k. 2.26	k. 18.7	240 000 000	281	k. 2	k. 17
		83 752 915 45 088 090	195 120										
479	3471	128 841 005	160	2k.99	24k.6	208 000 000	259	1.84	13.4	227 000 000	282	1.7	12.3
		84 260 626 57 898 664	192 136										
497	3718	142 159 290	165	3k.00	22k.5	231 000 000	256	1.93	14.5	242 000 000	280	1.8	13.2
		85 906 235 69 422 920	204 140										
575	3863	154 429 175	169	3k.42	25k	223 000 000	255	2.25	15.1	256 000 000	280	2.1	13.7
		60 906 543 55 118 865	128 134										
435	3607	116 325 408	151	3k.31	27k.5	195 700 000	249	2	16.4	212 000 000	259	1.8	15.1

LÉGENDE.

Colonne 5. Le travail est obtenu au moyen des indications fournies par un dynamomètre Morin placé derrière le tender. Cet instrument peut mesurer des efforts s'élevant à 2,200 kil. Le papier sur lequel les flexions du ressort sont tracées marche d'une manière continue et uniforme au moyen d'un mouvement d'horlogerie, depuis le moment du départ jusqu'à celui de l'arrivée. Les temps sont pointés de 15″ en 15″, et les espaces de 50^{m} en 50^{m} au passage devant chaque poteau du télégraphe électrique. Les éléments du travail sont calculés en multipliant chaque effort par l'espace pendant lequel il a été exercé; le travail total pour le parcours entier est la somme de tous les produits élémentaires.

Col. 6. La consommation en coke est donnée par la différence des poids livrés au mécanicien et en approvisionnement sur le tender au départ et à l'arrivée, en tenant compte, à chaque opération, de la quantité de ce combustible renfermée dans le foyer.

Col. 9. Le temps de la marche pendant lequel le régulateur a été fermé est fourni par les indications du dynamomètre.

Col. 12, 18 et 22. La force moyenne en chevaux développée pendant le temps correspondant à l'action de la vapeur a été obtenue en cherchant le nombre de kilogramètres produit pendant une seconde, et en divisant ce nombre par 75.

Col. 17. Pour obtenir la force en chevaux développée par la vapeur pour le remorquage du train brut, c'est-à-dire comprenant la machine, le tender et le train, mais en laissant en dehors les résistances passives ou frottements additionnels de la machine, on a admis que le tirage de la machine et de son tender seuls était de 500 kil. à la vitesse moyenne des trains remorqués et sur niveau, c'est-à-dire compensation faite des pentes et rampes. Cette donnée résulte d'expériences spéciales faites entre Paris et Melun, dont il sera rendu compte plus tard.

Col. 21. Pour obtenir la force totale en chevaux développée par la

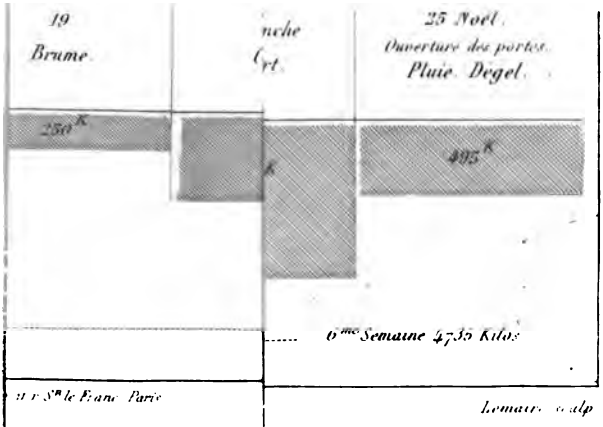
vapeur, c'est-à-dire la force nominale de l'appareil, on a admis avec Pambour que les frottements additionnels de la machine pendant son action étaient les 0,15 du tirage du train. Il est à remarquer que les résultats que l'on obtient ainsi pour le tirage total sont à peu près d'accord avec les résultats des dernières expériences de M. Gooch.

Observation. — On remarquera que la quantité de travail nécessaire au remorquage d'une tonne n'est pas beaucoup plus élevée pour les trains directs que pour les trains omnibus. Cette circonstance a lieu de surprendre au premier abord, puisque le tirage augmente incontestablement avec la vitesse; mais il ne faut pas perdre de vue que la résistance développée par les freins aux arrêts des stations figure dans la quantité totale de travail à produire, et que cette résistance est plus importante pour les trains omnibus que pour les trains directs, les arrêts et démarrages successifs étant beaucoup plus multipliés.

CONCLUSION.

Il résulte des données consignées sur le tableau ci-contre que dans les expériences rapportées la force effective produite en moyenne par les appareils employés au remorquage des trains s'est élevée à 250 chevaux, la force nominale pouvant être estimée à 272. Il en résulte également que la consommation moyenne par heure et par cheval effectif a été de $2^k,05$, et par heure et par cheval nominal de $1^k,89$.

Ainsi les machines locomotives peuvent développer les puissances considérables, et, sous le rapport de la consommation, elles sont dans des conditions comparables à celles des machines fixes, et notablement supérieures à celles admises pour les machines de bateaux à basse pression et à condensation.


19
Brume.
nche
rt.
25 Noël.
Ouverture des portes.
Pluie. Dégel.
250 K.
495 K.
6me Semaine 4735 Kilos
Lemaire sculp

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

(Avril, Mai et Juin 1852)

N° 17

Pendant ce trimestre on a traité les questions suivantes :

1° Emploi des traverses en fonte de M. Greaves adoptées en Angleterre, et principalement pour les pays méridionaux comme en Egypte (Voir le résumé des séances, page 79);

2° Discussion sur la détérioration des essieux des véhicules des chemins de fer (Voir le résumé des séances, pages 80 à 96 et 108 à 109);

3° Discussion sur le tracé du chemin de fer de ceinture dans l'est de Paris (Voir le résumé des séances, p. 197 à 104 et 117 à 122);

4° Communication d'une note sur l'emploi des alliages blancs dans les coussinets de machines et de voitures (Voir le résumé des séances, page 104);

5° Communication d'un nouveau système de rail-longrine applicable aux chemins de fer, par M. Th. Guibal de Mons (Voir le résumé des séances, pages 111 à 117 et 122);

6° Communication d'une note relative à la reconstruction en tôle du pont de Clichy sur le chemin de fer de Saint-Germain (Voir le résumé des séances, pages 123 à 132 et 136 à 146);

7° Communication sur l'emploi des feux couplés à vent forcé dans les travaux de chaudronnerie (Voir le résumé des séances, p. 133);

8° Communication sur l'emploi du régulateur oscillant dans les machines locomotives (Voir le résumé des séances, page 135);

9° Exposé de la situation financière de la Société par le trésorier (Voir le résumé des séances, page 148 *bis*).

Pendant ce trimestre la Société a reçu :

1° De la Société des Ingénieurs civils de Londres, les comptes-rendus de leurs séances.

2° De M. Nozo, une note sur l'emploi des alliages blancs dans les coussinets de machines et de voitures.

3° Du même, une note sur l'emploi des feux couplés à vent forcé dans les travaux de chaudronnerie.

4° Du même, une note sur l'emploi du régulateur oscillant dans les machines locomotives.

5° De M. Th. Guibal de Mons, une note sur un nouveau système de rail-longrine.

6° De M. Loustau, une note relative à des essais de torsion faits sur des essieux de chemin de fer.

7° De M. H. Mathieu, une note sur la démolition et la reconstruction de la tête du souterrain de l'Europe au chemin de fer de Saint-Germain.

8° De M. E. Jullien, ingénieur des forges de Montataire, un mémoire sur l'explication de la trempe.

9° Du même, un mémoire sur la démonstration pratique que tous les carbures de fer sont des dissolutions.

10° De MM. Chevandier et Salvetat, un exemplaire d'une note sur les eaux employées dans les irrigations.

11° De M. Guiraudet, un exemplaire de la description des appareils photographiques employés et organisés par M. Charles Brook à l'Observatoire de Greenwich.

12° Du même, un exemplaire d'une note sur l'emploi de la règle à calcul.

13° De M. Colladon, sept bulletins de la classe d'industrie et de commerce de la Société des arts de Genève.

14° De M. Le Chatelier, ingénieur en chef des mines, un exemplaire de sa notice sur les chemins de fer d'Angleterre en 1851.

15° De M. Lorentz, un exemplaire de son étude sur l'exposition universelle de Londres.

Les membres nouvellement admis sont les suivants, savoir :

Au mois d'avril :

MM. DE DION, présenté par MM. Eug. Flachat, Rhoné et H. Mathieu.

MOLINOS, présenté par MM. Eug. Flachat, Faure et H. Mathieu.

PRONNIER, présenté par MM. Eug. Flachat, Faure et Chabrier.

FLACHAT Jules, présenté par M. Eug. Flachat, Rhoné et H. Mathieu.

GAUDRY Jules, présenté par MM. Cavé, Edwards et Faure.

GUIRAUDET, présenté par MM. Eug. Flachat, Perdonnet et L. Yvert.

Note sur un magasin d'entrepôt de céréales construit sur le terre-plein, rive gauche, à l'extrémité Est du bassin de La Villette,

PAR M. E. VUIGNER.

EXPOSÉ.

Paris manquait d'entrepôt de céréales construit sur une grande échelle, et les besoins d'un tel établissement se faisaient journellement sentir. Le grenier d'abondance et la Halle aux blés n'ont pas, en effet, la spécialité particulière que réclamait le commerce des grains, et les magasins de Meaux, de Saint-Denis, de Corbeil, etc., ont trop peu d'importance pour permettre de grands approvisionnements particuliers et faciliter les transactions commerciales.

La création d'un vaste magasin public destiné spécialement à entreposer et à manutentionner pour leur conservation les grains, les graines et les farines, était donc une nécessité de l'époque; mais il fallait arriver au choix d'une localité réunissant les diverses conditions voulues pour un semblable établissement.

Les concessionnaires des canaux de l'Ourcq et de Saint-Denis et M. Victor Thoré, l'un des négociants les plus expérimentés du commerce de grains de Paris, conçurent l'idée de cette construction; ils s'entendirent pour l'établir à La Villette, et une Société particulière s'étant formée à cet effet, on éleva rapidement le magasin d'entrepôt qui domine le bassin de La Villette à son extrémité Est.

Pour rédiger le projet de ce vaste établissement et en diriger la construction, nous avons visité divers magasins ayant la même spécialité, soit aux environs de Paris, soit à Londres ou à Liverpool, etc.

Une expérience de quelques années ayant prononcé sur le système suivi, nous avons pensé qu'il pouvait être de quelque utilité de donner les détails de cette construction en indiquant les divers problèmes qu'on a cherché à résoudre pour arriver à réunir les conditions nécessaires à l'existence d'un établissement industriel de cette

importance. C'est dans ce but que la présente note a été rédigée avec les dessins qui y sont annexés. Nous dirons d'abord quelques mots sur le choix de la localité ; nous considérerons ensuite le magasin dans ses dispositions générales et dans le système particulier de sa construction, et nous donnerons enfin les détails de sa construction sous le rapport de la stabilité, de la salubrité et de l'exploitation.

CHOIX DE LA LOCALITÉ.

La Villette avait été indiquée comme la localité la plus convenable pour l'emplacement d'un magasin d'entrepôt de céréales à construire sur une grande échelle à la porte de la capitale. Cette localité pouvait être considérée, en effet, comme le centre des arrivages de grains par la voie d'eau ou par celle de terre.

Ainsi, tous les blés du Nord et du Midi se transbordant au Havre peuvent arriver, et arrivent le plus ordinairement, au bassin de La Villette, par la basse Seine et le canal Saint-Denis ; par le canal Saint-Martin, la haute Seine et la Marne, on peut diriger sur ce point les grains provenant de la Champagne et des autres provinces traversées par ces rivières ; le canal de l'Ourcq présente, d'un autre côté, une communication facile et économique entre La Villette, la Brie, le Multien et une partie du Soissonnais, dont les produits pourront être transportés plus tard en totalité par le canal de jonction de l'Ourcq à l'Aisne. Relativement aux communications par terre, la commune de La Villette est de même au point de jonction des routes de l'Alsace, de la Champagne, de la Flandre, de la Picardie et de la Normandie.

La localité étant ainsi désignée, il fallait choisir le point qui devait réunir les autres conditions nécessaires pour l'établissement de ce magasin, et, à cet égard, il ne pouvait exister aucun doute sur la position des terre-pleins dépendant du bassin de La Villette, situés à son extrémité Est, aux angles formés par la rue de Bordeaux et les quais de la Seine et de la Loire (fig. 1, pl. 24).

Ces terre-pleins, ayant chacun une superficie de 3,150 mètres carrés, présentaient une étendue suffisante; ils étaient disposés de telle sorte qu'il était possible d'établir des chenaux au milieu des magasins sans avoir à intercepter aucune route royale ou départementale, et l'on pouvait satisfaire ainsi à cette condition si essentielle de permettre aux plus grands bateaux d'entrer dans l'intérieur même des magasins, comme on l'a fait à Londres, pour opérer les déchargements des provenances de la voie d'eau avec le plus d'économie et de facilité possibles. La position de ces terre-pleins permettait aussi de disposer les magasins de telle sorte qu'on pût retrouver la même économie et la même facilité pour les déchargements et les rechargements des provenances de la voie de terre. Ces emplacements présentaient encore toute sécurité sous le rapport de la salubrité, car leur isolement assurait un aérage complet; il était possible, enfin, d'élever deux magasins semblables qui devaient dominer l'extrémité Est du bassin de La Villette d'une manière monumentale.

Le choix de ces terre-pleins fut donc adopté, et le magasin qui nous occupe est construit sur celui de la rive gauche, à l'angle de la rue de Bordeaux et du quai de la Loire.

Dispositions principales du magasin et de ses dépendances. — Le terre-plein occupé ne présente qu'une surface totale de 3,340 mètres carrés, déduction faite du chemin de halage que l'autorité supérieure a fait réserver.

Le magasin principal y occupe, sur une longueur de 59^{m}.00 et une largeur de 35^{m}.80, une superficie de 2,112^{mq}.20; la superficie restante est occupée par la cour de service, le chemin de ronde et autres dépendances (fig. 1, pl. 24).

La cour de service, d'une largeur libre de 8^{m}.80, règne dans toute la longueur du magasin, sur la façade principale donnant sur le quai de la Loire, et deux pavillons très simples sont placés aux angles extrêmes. Le pavillon d'amont sert de loge de concierge, et les bureaux de l'administration sont établis dans le pavillon d'aval. Des murs de clôture limitent la cour de service et le chemin de ronde,

et isolent ainsi le magasin principal de toutes les voies publiques à ses abords, condition indispensable pour un établissement de cette nature.

Un chenal de 8m.20 d'ouverture, établi parallèlement au chenal du pont tournant dans le prolongement du bassin de La Villette, se trouve placé au milieu du magasin, et s'étend dans l'intérieur jusqu'à 46m.00 de son extrémité Ouest. Un pont roulant en fonte, placé en tête de ce chenal, rétablit, lorsque besoin l'exige, la communication pour le halage.

Le magasin principal, d'une longueur de 59m.00 et d'une largeur de 35m.80 hors œuvre, ainsi que nous l'avons indiqué déjà, est élevé de six étages au-dessus du rez-de-chaussée, c'est-à-dire qu'il y a sept sols, le rez-de-chaussée et six planchers supérieurs (fig. 2). Il est divisé en quinze travées transversales et sept travées longitudinales, indépendamment d'une galerie intérieure dont il sera parlé plus loin. Ces travées sont espacées de 3m.80 d'axe en axe, à l'exception, dans le sens de la longueur, des deux travées extrêmes, qui n'ont que 2m.80 d'entre-axe, et dans le sens de la largeur de la travée du milieu, qui, correspondant au chenal intérieur, a, pour ce motif, une longueur de 8m.90.

A tous les points d'intersection de ces lignes de travées s'élèvent des poteaux montant d'étage en étage, et les poteaux extrêmes des travées dans l'un et l'autre sens sont distants des murs extérieurs de un mètre en moyenne; ils forment ainsi à chaque étage des galeries ou chemins de ronde au pourtour intérieur du magasin, et dégagent les murs de toute charge étrangère à leur propre poids.

Le sol du rez-de-chaussée est en moyenne, de 1m.20, en contre-haut du sol de la cour de service, ou de la rue latérale, portant le nom de *Quai de la Loire;* le premier étage est à 4m.00 au-dessus de ce rez-de-chaussée; les autres étages n'ont qu'une hauteur de 2m.85 d'un plancher à l'autre, et 2m.30 sous poutre.

Un seul toit dans un bâtiment de cette longueur eût entraîné dans des dépenses trop considérables. Pour rendre la construction plus

simple, on a formé cinq toits dans le sens de la longueur, et chacun occupe ainsi trois travées transversales. Par cette disposition, les faîtages n'ont qu'une élévation ordinaire au-dessus des corniches, et les murs n'éprouvent aucune poussée à leur partie supérieure. L'élévation est telle que cette division n'a rien de choquant à l'extérieur.

Des dispositions ont été prises pour l'établissement de deux machines à vapeur au milieu du bâtiment principal. Des constructions ont été faites à cet effet contre le mur de face à l'Est, à l'intérieur pour les chambres des machines, et à l'extérieur pour les chaudières. Une machine à vapeur fonctionne déjà dans l'une des chambres intérieures établies dans ce but.

Une machine d'épuration, dans le système de M. de Maupeou, est en outre établie dans l'encoignure Nord-Est à l'intérieur du magasin, et l'on a fait sur ce point toutes les constructions que réclamait l'installation de cette machine nécessaire à l'exploitation d'un entrepôt de céréales de cette importance.

Système particulier de construction. — Dans un magasin de cette étendue, et d'après les dispositions indiquées déjà, les murs ne devant former qu'une enveloppe d'enceinte, toute la stabilité du bâtiment ne pouvait être basée que sur le système de charpente, et c'est au choix de ce système que nous avons dû apporter tous nos soins.

Jusqu'ici et le plus ordinairement, en France, dans des constructions de ce genre, les poteaux montants sont en bois de chêne, et ils sont couronnés, d'étage en étage, par des chapeaux en bois de même essence, qui servent d'appui aux poutres supportant les planchers. Les poteaux montants des étages supérieurs viennent s'emmancher sur ces chapeaux quand ils ne portent pas directement sur les poutres, ce qui arrive le plus souvent encore.

En Angleterre, les poteaux montants en bois sont remplacés généralement par des colonnes en fonte couronnées par des espèces de chapiteaux de même métal, qui les relient entre elles aux points de jonction, et qui servent en même temps à supporter les poutres en moises qui viennent embrasser les colonnes dans leur partie inférieure.

Le système suivi en France présente les plus graves inconvénients; les expériences ne manquent pas pour confirmer l'exactitude de cette assertion.

D'un côté, le mode d'assemblage des poutres entre elles et avec les poteaux montants laisse beaucoup à désirer sous le rapport de la solidité. D'un autre côté, on sait que les bois se compriment sensiblement dans le sens longitudinal des fibres, et cette compression a lieu, dans l'espèce, non seulement pour les chapeaux couronnant les poteaux à chaque étage, mais encore pour les poutres dont ils forment les appuis. Cet effet détermine évidemment un tassement, ou, pour mieux dire, un abaissement qui augmente d'étage en étage, et qui devient assez fort dans les étages supérieurs pour modifier notablement le nivellement des planchers.

Un défaut dans la qualité du bois ou une différence dans sa nature suffit pour que des poteaux montants pénètrent dans l'épaisseur même des poutres, et il en résulte alors des affaissements d'une autre nature qui se transmettent aux étages supérieurs d'une manière d'autant plus nuisible qu'il en résulte des inégalités de tassement d'un poteau à l'autre.

Le magasin de Corbeil, celui de Saint-Denis et la majeure partie des magasins que nous avons visités présentent des exemples frappants de ces divers effets et des inconvénients qui en résultent sous le rapport de la stabilité et de l'exploitation.

Le système suivi en Angleterre remédie certainement à ces inconvénients; mais son adoption eût entraîné ici dans une augmentation de dépenses considérable, par suite du prix élevé des fontes.

Nous avons cherché à concilier ces deux systèmes, et nous avons fini par admettre un système mixte qui, selon nous, satisfait à la fois à la question de stabilité et à la question d'économie.

Nous avons conservé les poteaux montants en bois de chêne; mais, pour éviter les effets de la compression, nous les avons couronnés d'étage en étage par des chapeaux en fonte ayant la même destination que les chapiteaux couronnant les colonnes dans le système an-

glais. Et, en effet (fig. 6, 7 et 8), ces chapeaux embrassent dans leur partie inférieure les têtes des poteaux montants; une partie pleine est interposée entre les deux poteaux, et une mortaise y est ménagée pour le tenon du poteau supérieur, dont le pied est ainsi convenablement assujetti. Des poutres en moises, portant en entier sur la partie supérieure des chapeaux, viennent embrasser les pieds des poteaux dans le sens de la largeur du bâtiment, et des solives principales viennent également les embrasser dans le sens de la longueur. Pour mieux assujettir encore les pieds des poteaux montants, les poutres en moises sont entaillées d'une certaine quantité, variable selon les étages, et elles sont maintenues dans leur position par des plates-bandes *m* reliées par des boulons, qu'il y ait ou non joint d'assemblage, de telle sorte que chaque système de poutres forme ainsi un tirant dans le sens de la largeur. Les solives principales sont reliées de même par des plates-bandes en fer *n*, mais seulement à leur point de jonction, et elles forment tirant dans le sens de la longueur. Un seul réseau de charpentes forme donc à chaque étage la constitution du magasin.

Dans ce système, les murs n'ont à supporter aucune charge, et ils ne servent réellement que d'enveloppe. On n'a dû leur donner dès lors que des dimensions suffisantes pour leur propre stabilité, en les reliant, du reste, à ce réseau de charpentes au moyen d'ancres et de tirants placés à chaque étage aux abouts des moises transversales et longitudinales.

Il est résulté de ce système particulier de construction une grande simplicité d'assemblages, et on a pu apporter beaucoup d'économie dans l'exécution, comme on en jugera par les détails dans lesquels nous allons entrer.

DÉTAILS DE CONSTRUCTION SOUS LE RAPPORT DE LA STABILITÉ.

Fondations. Maçonnerie. — Le sol sur lequel est assis le magasin était composé de terrains de remblais, d'une couche de terre vé-

gétale, assez spongieuse dans la partie supérieure et sablonneuse dans la partie inférieure, et d'un banc d'argile recouvrant le banc de plâtre de cette partie du bassin de Paris.

On a traversé les terrains de remblais ainsi que la couche de terre végétale; on a même entamé la partie supérieure du banc d'argile, et l'on a établi les fondations sur l'argile pure, dont l'épaisseur constatée par des sondes a été reconnue de 10^m en moyenne.

Le sol du rez-de-chaussée du magasin avait été fixé à $1^m.50$ en contre-haut du couronnement des murs des quais du bassin de La Villette, pour faciliter son exploitation; cette élévation, combinée avec la position de la surface supérieure du banc d'argile, inclinée assez sensiblement de l'amont à l'aval, a déterminé une hauteur moyenne de fondation de $3^m.40$, dont $2^m.15$ en béton jusqu'à la hauteur du sol naturel, et $1^m.25$ en maçonnerie de meulières et pierres de taille, de ce sol naturel au sol du rez-de-chaussée. Les fondations des murs du chenal ont dû être descendues évidemment à une plus grande profondeur, et elles ont été portées en effet à $1^m.50$ en contre-bas de la profondeur moyenne ci-dessus indiquée, ou mieux à $0^m.90$ au dessous du fond du bassin de la Villette.

Le chenal est de la même profondeur que ce bassin; son plafond est recouvert d'une couche de béton de $0^m.30$ d'épaisseur, établie autant pour éviter les infiltrations qui pouvaient avoir lieu au travers des petites veines de sable coupant le banc d'argile que pour déterminer une profondeur invariable limitant les dragages à faire dans l'avenir.

La couche de béton formant les fondations des murs au pourtour du bâtiment n'a qu'une largeur de $1^m.20$, avec des empattements de $0^m.35$ à l'extérieur et de $1^m.45$ à l'intérieur, aux quatre encoignures. Ces fondations sont reliées avec celles des murs du chenal, dans le sens de la largeur, sur quatre points différents, selon la ligne correspondante à la division des toits, et, dans le sens de la longueur, selon le prolongement des murs de ce même chenal. Les massifs de béton, d'un mètre de largeur, qui forment cette liaison, servent de fon-

dation à six lignes de poteaux montants. Les fondations des autres poteaux montants placés à 1^{m} des murs, et formant avec eux une galerie à l'intérieur, sont reliés avec les fondations des mêmes murs au moyen des massifs de béton, descendus encore à la même profondeur de 1^{m}.45 sur 1^{m}.00 de largeur. Il n'y a donc d'isolées que les fondations des quarante-deux poteaux montants, qui n'ont pas à supporter le poids des toitures et des charpentes qui les composent. Ces massifs isolés n'ont qu'une longueur de 1^{m}.50 sur 1^{m}.00 de largeur, mais ils sont établis de même sur le banc d'argile (fig. 1 et 3).

Le complément des fondations est fait, avons-nous dit, en maçonnerie de meulières et de pierre de taille.

Les quatre angles d'encoignure du socle du mur formant l'enveloppe du bâtiment, ainsi que les têtes de jonction avec les murs du chenal, sont en pierre de taille; une assise courante, aussi en pierre de taille, règne au pourtour, pour former le couronnement du socle au niveau du rez-de-chaussée; les maçonneries restantes, dont la largeur est réduite à 0^{m}.85, sont en meulières hourdées en mortier hydraulique.

Les massifs pour fondation des poteaux montants sont complétés par des maçonneries de meulières couronnées à l'axe de ces poteaux par des libages carrés de 0^{m}.80 de côté et de 0^{m}.40 de hauteur, dont la partie supérieure est aussi au niveau du sol du rez-de-chaussée.

Les murs au pourtour s'élèvent sur ces fondations selon une section pyramidale, c'est-à dire que leur épaisseur, qui est de 0^{m}.75 dans leur partie inférieure, est réduite à 0^{m}.55 dans leur partie supérieure. Cette différence est rachetée par des retraites ou des talus de 0^{m}.10 (ensemble), à l'intérieur comme à l'extérieur. Les encoignures sont en pierres de taille, ainsi que les corps carrés et les voussoirs de l'arc passant au-dessus du chenal; on a mis aussi en pierres de taille les appuis des croisées, et l'on a construit en briques les arcs formant la partie supérieure de ces baies; les autres parties de ces murs sont construites en meulières hourdées en mortier hy-

draulique jusqu'au premier étage, et en moellons hourdés en plâtre du premier étage à la corniche.

Les murs du chenal, dont la hauteur est de 4^{m}.00 au-dessus du fond, ont dans le bas une épaisseur de 1^{m}.50, qui se réduit à 1^{m}.00 dans le haut au moyen de trois retraites intérieures de 0^{m}.10 chacune, et d'une inclinaison de un vingtième à l'extérieur sur le parement visible. Ces murs sont construits en meulières hourdées en mortier hydraulique, avec chaînes en pierres de taille sous les pieds de l'arc du mur en élévation en regard du bassin de La Villette, et au point d'intersection du mur de quai de ce bassin. Ils sont couronnés aussi par une assise de 0^{m}.30 de hauteur et de 0^{m}.70 de largeur.

Des murs de 0^{m}.50 d'épaisseur, s'élevant jusqu'au premier étage, forment la clôture du chenal au rez-de-chaussée du magasin. Ces murs sont construits en meulières hourdées en mortier hydraulique, et il y a des chaînes en pierres de taille pour base de tous les poteaux montants qui viennent s'appuyer sur ces murs.

Enfin, au-dessus des libages, couronnant les massifs de fondation des poteaux montants, sont placés des dés en pierre de roche de 0^{m}.50 de hauteur sur 0^{m}.50 en carré dans la partie inférieure et 0^{m}.45 dans la partie supérieure, sur les têtes desquels viennent reposer ces poteaux montants.

Si l'on examine les diverses dimensions ci-dessus indiquées, on jugera facilement qu'elles sont calculées de manière à satisfaire aux conditions d'une bonne stabilité.

Ainsi, en admettant que chaque centimètre carré de la section transversale d'une couche de béton puisse être chargé avec sécurité d'un poids de 4 kilogrammes, le massif de béton formant la fondation des murs au pourtour du bâtiment, présentant une section de 12,000 centimètres carrés, eût pu être chargé de 48,000 kilogrammes, et ces murs n'exercent sur lui qu'une pression maximum de 31,400 kilogrammes.

La pierre de roche d'Arcueil, près Paris, supporte avant de s'é-

craser une charge de 253 kilogrammes par centimètre carré, et l'on peut sans aucune espèce d'inconvénient la charger du sixième de ce poids, soit de 42k.170 par centimètre carré. Chaque dé de 0m.45 sur 0m.45 dans la partie supérieure présentant une superficie de 1,915 centimètres carrés, déduction faite des angles rabattus, aurait donc pu supporter une charge de 83,280 kilogrammes, et la pression maximum qu'ils peuvent éprouver dans l'espèce n'est que de 78,184 kilogrammes. Les dés des poteaux montants sur lesquels s'appuient les toitures ont à supporter, en effet, la charge de six planchers sur 3m.80 en carré, et en outre le poids des constructions. Admettant le blé empilé sur un mètre de hauteur, ainsi qu'on l'a fait plusieurs fois déjà, la charge maximum par mètre superficiel de plancher est de 100 hectolitres, à un poids moyen de 752 kilogrammes.

Or, six planchers de 3m.80 en carré forment une surface totale de 86mq.64;

Et à raison de 752 kilogrammes par mètre carré, ils ont ensemble un poids de. 65,153k.28

Ajoutant un cinquième en sus pour le poids des constructions. 13,030k.65

On obtient le chiffre dé. 78,183k.93

D'autres exemples pourraient prouver encore que les résistances ont été calculées sur des bases aussi larges pour les autres parties des maçonneries composant le magasin.

Charpenterie et serrurerie. — Nous avons dit déjà, en parlant du système particulier de construction, qu'à tous les points d'intersection des lignes de travées s'élèvent des poteaux montants en bois de chêne reliés à chaque étage par des moises longitudinales et transversales qui supportent les planchers et forment autant de tirants qui s'attachent aux murs extérieurs.

Chaque système de poteaux montants présente comme les murs

une section pour ainsi dire pyramidale coupée à chaque étage par les chapeaux en fonte qui constituent leur assemblage. Au rez-de-chaussée, l'équarrissage des poteaux est de 0m.35; il n'est que de 0m.30 au dessus, et diminue progressivement de 0m.02, d'étage en étage, pour se réduire à 0m.20 à l'étage supérieur (fig. 2 et 3).

D'après les expériences de Rondelet, la force nécessaire pour écraser un cube en bois de chêne est de 385 à 462 kilogrammes, ou, en moyenne, de 423k par centimètre carré, et elle ne diminue pas sensiblement pour un prisme dont la hauteur ne dépasse pas huit fois l'épaisseur. Or les poteaux du rez-de-chaussée présentent chacun, déduction faite des angles abattus, une section de 1200 centimètres carrés. Le maximum de la résistance à l'écrasement sera donc pour ces poteaux de . . . . . 507,600kil.

C'est une résistance six à sept fois plus considérable que la charge que nous leur faisons supporter, puisqu'elle n'est, ainsi que nous l'avons vu plus haut, que de . . . . . 78,184kil.

En ne considérant que la résistance à l'écrasement, nous aurions pu nous borner pour ces poteaux à un équarrissage de 0m.32 sur 0m.32, mais ils n'auraient pas été dans les conditions de pièces de bois chargées debout et ne pouvant pas plier, et, pour rester dans cette condition, nous avons porté cet équarrissage à 0m.35 sur 0m.35, au huitième environ de leur hauteur.

Nous avons admis pour les poutres et les solives du plancher l'emploi de bois de sapin du nord.

Comme les poutres ont à supporter une charge verticale, et que de plus elles agissent horizontalement pour former les liaisons du système général de charpente sous un effort de traction, nous avons augmenté les dimensions que les calculs de résistance avaient déterminées. Ainsi nous avons donné aux poutres des planchers supérieurs un équarrissage de 0m.32 sur 0m.16, formant pour les deux

une largeur de $0^m.32$, et pour les poutres du premier plancher nous avons admis une épaisseur de $0^m.35$ sur une largeur (ensemble) de $0^m.32$.

Quant aux solives des divers planchers, ce sont purement et simplement des madriers de sapin, d'une épaisseur de $0^m.24$ sur une largeur de $0^m.08$, tels qu'ils sont livrés au commerce de Paris, et leur espacement moyen de milieu en milieu est de $0^m.34$. Les solives adossées aux poteaux montants, et formant les moises longitudinales de liaison, ont la même hauteur de $0^m.24$, mais leur largeur est de $0^m.12$.

A l'exception des travées du milieu, l'espacement des travées est de $3^m.80$ en longueur comme en largeur. La charge maximum à supporter par les poutres n'est que de 11,945 kilogrammes répartis iunformément entre les points d'appuis $(752^k (3.80)^2 + \frac{1}{16}$ pour le poids des planchers).

Chaque solive considérée isolément n'a à supporter qu'une charge maximum de 1020 kil. répartis uniformément aussi sur sa longueur.

Si l'on considère que les chapeaux en fonte qui supportent les poutres réduisent à $2^m.60$ la distance entre leurs points d'appuis réels, que les plates-bandes et les boulons qui relient ces poutres avec les poteaux montants font l'effet d'encastrement, et qu'enfin les planchers viennent établir la liaison des solives entre elles et avec les poutres, on se convaincra facilement que les dimensions admises satisfont convenablement aux conditions voulues pour une bonne stabilité.

Pour augmenter la résistance des poutres en moises, nous avons établi en outre une solidarité entre les deux pièces, au moyen d'un boulon les reliant au milieu de leur portée, et traversant une cale en bois d'une épaisseur de $0^m.08$ égale à leur écartement.

Armature des poutres des travées du centre au dessus du chenal. — Nous avons dit que la largeur de la travée du centre du magasin correspondant au chenal intérieur est de $8^m.90$. Cette largeur était considérable pour des poutres en moises de $0^m.32$ sur

0m.32 ensemble, telles que nous les avions admises. En appliquant en effet la formule de Navier, on trouve que la charge la plus considérable qu'on pouvait leur faire supporter en la répartissant uniformément sur leur longueur n'était que de 3,026 kilogrammes, et le poids total du plancher correspondant à chacune d'elle est de 2,460 kilogrammes.

Ces poutres n'ayant ainsi que la résistance voulue pour supporter sans altération le poids du plancher, il y avait nécessité de les armer, et de disposer les armatures de manière à résister à la charge des marchandises, dont le minimum, en admettant une hauteur de blé de 0m.66 et un passage de 2m.00 au milieu, devait être de 10,840kil

Et dont le maximum, en admettant une épaisseur en blé de 1 mètre, avec le même passage, pouvait s'élever à 13,290kil

Après plusieurs études et plusieurs expériences sur des poutres en moises garnies d'armatures en bois (études et expériences dont il serait trop long de donner les détails), nous avons fini par adopter le système dont les dispositions sont indiquées fig. 4 et 5.

Cette armature en fer est formée de deux barres de 0m.08 sur 0m.027 posées de champ. La pièce supérieure est courbée en arc de 0m.52 de flèche, bandée entre deux talons saillants placés aux extrémités de la deuxième pièce, qui forme ainsi la corde de l'arc. Ces deux pièces sont liées entre elles par huit étriers en fer et des cales chassées avec force entre l'arc et la corde, au point où les étriers, les embrassant, les rendent, pour ainsi dire, solidaires. Des manchons en fonte viennent encore embrasser leurs abouts, non seulement pour augmenter la force des talons saillants de la corde, mais encore pour donner plus d'assiette pour la pose de l'armature.

Ces armatures sont posées entre les poutres formant moises, et elles remplissent l'intervalle de 0m.08 laissé entre elles. Les manchons en fonte sont adossés aux poteaux montants, et ils portent, sur

la plate-forme supérieure, des chapeaux en fonte, dont l'épaisseur a été augmentée pour résister à ce surcroît de pression. D'un autre côte, l'un des boulons de la plate-bande qui relie et maintient tout à la fois les poutres en moises avec les poteaux montants passe dans un œil ménagé à chaque extrémité de l'arc, de telle sorte que les armatures peuvent être considérées comme encastrées à leurs abouts.

Quatre patins portés par l'armature, et ayant dans leur partie inférieure $0^{m}.16$ de saillie, servent d'appui. Ces poutres sont reliées en outre sur quatre points par des boulons qui maintiennent leur écartement, et les serrent fortement contre les armatures, au renversement desquelles elles forment ainsi un puissant obstacle. Les solives viennent encore concourir au même but, en s'adossant aux armatures.

D'après Dubua, chacune de ces armatures doit résister comme une pièce pleine de la largeur et de la plus grande épaisseur du système, et posée entre deux points d'appui, dont la distance moyenne dans l'espèce est de $8^{m}.26$, et, en admettant la formule de Navier, la charge maximum répartie uniformément sur la longueur peut être de 11,785 kilogrammes. Ce chiffre pourrait même être augmenté en ayant égard, dans l'espèce, à l'encastrement où se trouvent les abouts des armatures. L'expérience a justifié ces principes de stabilité, car la charge maximum que ces armatures ont eue à supporter jusqu'ici a varié dans les limites de 10,840 à 13,290 kilogrammes.

Nous aurions pu adopter le même système d'armatures pour les poutres de la travée du centre du premier étage; mais nous avons pensé qu'il fallait se ménager la possibilité de donner plus de force aux armatures des étages supérieurs pour le cas où l'on voudrait plus tard augmenter la charge en marchandises des planchers correspondants, et cette considération importante nous a fait adopter pour les poutres que nous considérons un autre système de consolidation.

Les poutres de la travée du centre au premier étage, ainsi que nous l'avons indiqué déjà, sont appuyées sur les piles en pierres de taille établies, à cet effet, dans les murs clôturant le chenal au rez-

de-chaussée. Leurs armatures sont composées d'un arc de 4m.20 de rayon formé par trois pièces de bois de 0m.07 de hauteur sur 0m.18 d'épaisseur, reliées ensemble au point de jonction par des plates-bandes en fer, et passant au milieu des moises. Cet arc vient s'appuyer de chaque côté sur un socle en pierre de taille déterminé par l'élargissement des deux premières assises, disposées selon le même rayon de courbure. Deux pièces de bois chacune de 0m.27 sur 0m.11 s'appuyant sur le même socle s'élèvent jusqu'au dessous des poutres, auxquelles elles viennent servir d'appui en s'inclinant tangentiellement à l'arc intérieur, et elles forment moises dans la partie inférieure de l'arc, au pied duquel un sabot en fonte embrasse tout le système. Chacune de ces moises embrasse aussi dans sa partie supérieure un lien servant à relier les poutres à l'arc à son point le plus faible. Les poutres et les armatures sont enfin rendues solidaires au sommet de l'arc au moyen d'un étrier convenablement disposé à cet effet.

Ce système de consolidation des poutres dans la travée du centre au premier étage présente évidemment une force suffisante pour qu'on puisse, lorsqu'on le jugera convenable, y appuyer de légères colonnes en fonte, qui, s'élevant d'étage en étage, réduiraient à 6m.50 la largeur de la travée du centre, et viendraient y consolider les armatures en fer aux points les plus faibles et en même temps les plus chargés.

Chapeaux en fonte. — Nous ne terminerons pas ces détails de consolidation sans indiquer la forme et les dimensions principales des chapeaux en fonte couronnant les poteaux montants à chaque étage, et dont nous n'avons parlé jusqu'ici que d'une manière générale.

Ces chapeaux (fig. 6, 7 et 8) sont composés d'un corps carré creux formant manchon pour embrasser la partie supérieure des poteaux sur une hauteur de 0m.15, d'une plaque supérieure servant de plate-forme pour supporter les poutres, et de quatre consoles en nervures reliant les extrémités de la plaque supérieure avec les angles rabattus du corps carré. L'épaisseur de la fonte de cette première partie du chapeau est de 0m.02 pour les chapeaux des poteaux montants

du rez-de-chaussée, et elle est réduite à $0^m.015$ au dernier étage, en diminuant ainsi progressivement d'étage en étage. Quant aux dimensions en longueur et largeur, elles sont telles que le bois affleure l'extérieur de la fonte.

Les plaques supérieures formant plates-formes ont toutes une largeur de $0^m.40$ (largeur des moises, y compris l'intervalle de $0^m.08$ laissé entre elles); mais leur longueur est variable à chaque étage. Cette longueur est de $0^m.77$ au rez-de-chaussée, et elle est réduite à $0^m.64$ au dernier étage. L'épaisseur de la fonte de ces plaques est de $0^m.03$ pour les chapeaux des poteaux limitant les grandes travées du centre, et de $0^m.025$ pour les autres chapeaux. Pour toutes les plaques, cette épaisseur est de $0^m.05$ dans la partie intermédiaire entre les deux poteaux, et dans cette dernière partie on a ménagé une mortaise de $0^m.025$ de profondeur pour le tenon correspondant du poteau supérieur. Les fontes des consoles formant nervures ont une épaisseur semblable à celles des corps carrés auxquels elles correspondent.

Charpente des toits. — On a vu que la couverture du magasin était divisée en cinq toits dans le sens de la longueur. Chacun de ces toits a donc une portée de $11^m.40$ (cinquième de la longueur du bâtiment); il comprend ainsi trois travées longitudinales, et il est composé de cinq fermes entières.

Un entrait principal de $0^m.30$ sur $0^m.20$, s'appuyant sur les poteaux montants correspondants, établit la liaison des cinq toits à chaque ferme, en formant en même temps un tirant longitudinal, et un cours de moises de $0^m.26$ sur $0^m.25$ (ensemble) établit la liaison des fermes entre elles, tout en formant aussi un tirant transversal. Ce cours de moises est indépendant d'une sablière en chêne de $0^m.20$ d'équarrissage qui règne entre les toits et tout au pourtour du bâtiment, pour l'appui des chevrons.

Chacune des fermes a la forme ordinaire, et il est inutile ainsi d'entrer dans le détail des pièces de bois qui la composent.

La ferme du milieu, correspondant au chenal intérieur, venant

s'appuyer sur le milieu des moises de cette travée de 8m.90 de largeur, il a été nécessaire d'armer ces moises, ce que l'on a fait au moyen de deux pièces de bois s'arc-boutant et venant porter sur les poteaux montants, dont la tête a été consolidée pour résister à cette poussée.

Tous ces toits sont terminés par des croupes sur l'une et l'autre façade du bâtiment, à l'exception du toit du milieu, qui forme fronton sur la façade principale.

La hauteur des toits au dessus des entraits est de 3m.25; la couverture est en ardoises, et des cheneaux en plomb sont disposés tout au pourtour du bâtiment, comme entre les noues des toits, pour l'écoulement des eaux de pluie.

Effets produits depuis la construction.— Nous avions admis que les murs formant l'enveloppe du bâtiment, construits partie en meulières hourdées en mortier hydraulique et partie en moellons ordinaires hourdés en plâtre, éprouveraient un certain tassement, et qu'il n'en serait pas ainsi des poteaux montants. Pour obvier aux effets de cette différence du tassement, nous avions laissé un vide au dessus des poutres et des solives principales dont les extrémités venaient porter sur les murs, en s'appuyant sur des cales en bois disposées à cet effet.

Nos prévisions se sont réalisées quant au tassement des murs; il a été en réalité de 0m.08 à 0m.09 sur la hauteur totale.

Il y a aujourd'hui dans la partie supérieure du bâtiment, entre le dessous des entraits et les cales en bois sur lesquelles ils reposaient au moment de la construction, un vide de 0m.05 à 0m.06, et les abouts des entraits ont pris une inflexion de 0m.03 à 0m.04, ce qui forme le tassement total de 0m.08 à 0m.09 ci-dessus indiqué.

Ce tassement, ou, pour mieux dire, cette différence de tassement, n'existe que sur la hauteur de 21m.20 du sol du rez-de-chaussée au dessus de la corniche; la retraite formant à l'extérieur le niveau du sol de ce rez-de-chaussée, le couronnement des murs du chenal intérieur, et le dessus des libages sur lesquels s'appuient les dés des po-

teaux montants ont conservé, pour ainsi dire, leur niveau primitif, ce qui prouve qu'il n'y a pas eu de tassement dans la fondation.

DÉTAILS DE CONSTRUCTION SOUS LE RAPPORT DE LA SALUBRITÉ.

Moyens employés pour remédier aux inconvénients résultant de la présence du chenal intérieur. — Un chenal a été ménagé dans le milieu du magasin, ainsi que nous l'avons indiqué déjà. Bien que ce chenal ne soit, pour ainsi dire, que le prolongement du bassin de La Villette, les eaux y seraient restées croupissantes, et elles auraient fini par donner une odeur nuisible à la conservation des grains. Pour éviter cet inconvénient, on a établi un aqueduc partant de l'extrémité amont du chenal sur sa rive droite, et venant déboucher dans la berge du canal immédiatement en amont du pont tournant de La Villette. Les bateaux de grandes dimensions, occupant presqu'en totalité la largeur entre les culées dudit pont, forment obstacle, au moment de leur passage, à l'écoulement des eaux, et il s'établit alors un courant dans l'aqueduc, et, par suite, un renouvellement souvent répété des eaux du chenal.

La présence de ce chenal intérieur pouvait aussi donner de l'humidité dans les parties basses du rez-de-chaussée du magasin; plusieurs moyens ont encore été employés pour remédier à cet inconvénient.

D'abord, les murs en élévation clôturant le chenal au rez-de-chaussée, construits déjà en meulières hourdées avec mortier de chaux hydraulique et sable, ont été enduits à l'extérieur comme à l'intérieur avec une forte couche de même mortier, rendu plus énergique par l'addition de ciment de Vassy dans la proportion de 1 sur 3 (une partie de ciment contre trois parties de mortier hydraulique). Cet enduit, exécuté par les ouvriers de MM. Gariel et compagnie, a acquis une dureté presque comparable à celle des pierres de taille formant les piliers au dessous des poutres.

Ensuite, les planchers du rez-de-chaussée ont été isolés des

murs du pourtour du magasin et des murs du chenal ; on a formé ainsi, au pourtour, des galeries de service, dont le sol, formé d'une couche de béton de $0^m.20$ d'épaisseur, a été bitumé sur une épaisseur de $0^m.025$.

Les planchers, eux-mêmes en frises de bois de chêne de $0^m.034$, sont en saillie de $0^m.12$. Les lambourdes qui les supportent sont placées en lignes continues dans le sens de la largeur du bâtiment ; elles sont appuyées sur des massifs longitudinaux d'une largeur et d'une hauteur de $0^m.40$, et l'intervalle entre ces massifs est garni des débris des matériaux de construction. Il existe ainsi des courants d'air au dessous des planchers de ce rez-de-chaussée.

Des grillages en fils de fer établis au pourtour forment obstacle au passage des animaux rongeurs dans les vides entre les lambourdes.

L'expérience a prouvé de la manière la plus positive que toutes ces dispositions réunies avaient eu l'effet qu'on en attendait. Ainsi, depuis la construction du magasin, on n'a pas remarqué la moindre trace d'humidité, et cette situation de siccité parfaite s'est maintenue aussi bien pendant les plus forts dégels qu'après les plus fortes pluies.

Cette situation obtenue pour le rez-de-chaussée, il fallait disposer les étages supérieurs de manière à réunir les meilleures conditions possibles pour la conservation des grains.

Moyens d'aérage dans les étages supérieurs. — Des motifs de salubrité et d'exploitation ont fait donner une hauteur de $3^m.40$ sous poutre au rez-de-chaussée. On s'est borné pour les étages supérieurs à une hauteur de $2^m.30$, donnant $2^m.60$ de hauteur sous solives, et $2^m.85$ entre les planchers. Ces hauteurs étaient peut-être plus que suffisantes pour un bon aérage ; mais elles étaient indispensables pour le pelletage des blés empilés à 1^m de hauteur.

Le bâtiment étant placé, pour ainsi dire, selon la ligne Est et Ouest, il n'y avait aucun inconvénient à garnir de croisées à carreaux les baies des façades exposées au Nord et à l'Est, et l'on a admis

pour ces façades ce système de fermetures, permettant de donner du jour aux divers étages et d'y faciliter ainsi le service. L'action du soleil était à craindre, au contraire, pour les façades exposées au Midi et à l'Ouest, et pour les baies de ces façades on a employé des persiennes à lames mobiles.

Les croisées comme les persiennes laissent une ouverture libre de $1^{m}.14$ de largeur sur une hauteur moyenne de $1^{m}.48$ entre les dormants. Elles s'ouvrent et se ferment en pivotant au milieu de leur hauteur. Cette manœuvre s'opère au moyen d'une espèce de poignée à genouillère fixée à leur partie inférieure et formant crémaillère pour obtenir divers degrés d'ouverture. Ce système de ferrures permet d'ouvrir ou de fermer avec la plus grande promptitude toutes les croisées et les persiennes : c'était une condition à remplir dans un magasin de cette importance, car le nombre de bras y est considérable, et il n'y a pas un moment à perdre pour cette manœuvre en temps d'orage. On l'a admis ainsi, du reste, avec l'intention d'adapter plus tard à chaque étage un mécanisme qui aurait pour effet d'ouvrir et de fermer toutes les croisées et les persiennes à la fois, comme on l'a fait à Londres.

Il est bon d'observer encore qu'avec ce système, les eaux de pluie poussées par le vent ne peuvent pas pénétrer dans le magasin, et l'air arrivant par la partie supérieure des baies, il s'établit au dessus des couches de grains un courant favorable à leur conservation, surtout pendant l'opération du pelletage.

Les persiennes sont à lames mobiles, avons-nous dit; ces lames sont fixées à une autre pièce de bois à poignée qui permet de les faire mouvoir toutes à la fois, de manière à établir un courant d'air, sans être gêné par le soleil, en leur donnant une position horizontale. On obtient au contraire une partie pleine, et en conséquence une fermeture complète, en donnant à la lame une position verticale.

Au moyen de ces dispositions et de ces manœuvres combinées des croisées et des persiennes des diverses expositions, on arrive à un aérage tel que, dans les plus grandes chaleurs, le thermomètre ne

monte pas dans l'intérieur du magasin à plus de 15 degrés centigrades, température sous laquelle les charençons ne peuvent pas éclore.

La température peut s'élever davantage dans l'étage supérieur sous le toit; mais il n'en résulte pas d'inconvénient, car le plancher de cet étage est réservé pour les avoines ou les autres grains légers et de moindre valeur.

Nous avons établi enfin quatre paratonnerres, dans des positions telles que la totalité du bâtiment principal puisse être garantie par eux, leur sphère d'influence ayant été combinée à cet effet.

DÉTAILS DE CONSTRUCTION RELATIFS A L'EXPLOITATION DU MAGASIN.

Fixation du sol du rez-de-chaussée pour la facilité des chargements et des déchargements des marchandises. — Les murs de quai du bassin de La Villette sont à 1^{m}.50 en contrebas du couronnement des culées du pont tournant, et la rue latérale, portant le nom de Quai de la Loire, se trouve en moyenne à 1^{m}.20 en contrebas de ce même couronnement au droit de la façade principale du magasin que nous considérons. En élevant le sol du rez-de-chaussée de ce magasin à 1^{m}.50 au dessus des murs du bassin, nous l'avons donc établi au même niveau que le couronnement du pont tournant, et à 1^{m}.20 au dessus de la chaussée de la rue latérale. Cette hauteur a été ainsi fixée pour que les voitures opérant des chargements dans la cour du magasin aient leur plancher de niveau avec le sol du rez-de-chaussée, et qu'en s'adossant aux baies de service, leur chargement ou leur déchargement puisse s'opérer avec la plus grande facilité.

Cette surélévation du sol du rez-de-chaussée, favorable pour le mouvement des marchandises par voitures, était nécessaire pour la facilité du mouvement des marchandises par bateaux, car l'eau se maintient en contrebas à un niveau tel que le bordage des

bateaux se trouve en moyenne à la hauteur même de ce rez-de-chaussée. Cette surélévation était indispensable, du reste pour obtenir au dessous des poutres du premier étage une hauteur suffisante pour que les bateaux de grandes dimensions puissent entrer dans le chenal intérieur du magasin.

Machine à vapeur, tire-sacs, baies de service, etc. — Une machine à vapeur de la force de dix chevaux a été établie dans une chambre disposée à cet effet entre l'extrémité amont du chenal intérieur et le mur de face à l'Est. Cette machine à vapeur donne le mouvement à un arbre vertical, qui s'élève du rez-de-chaussée jusqu'au dessous du plancher du sixième étage, et s'y trouve en communication avec un arbre horizontal qui s'étend dans toute la longueur du magasin. Des roues d'angle adaptées à cet arbre horizontal transmettent le mouvement à cinq tire-sacs placés au dernier étage au dessus de cet arbre de couche, et au centre de chacune des cinq travées de toiture.

Ces tire-sacs, garnis de leurs tendeurs, comme dans les moulins ordinaires, sont à double effet, c'est-à-dire que, lorsqu'un câble s'enroule sur le treuil, un autre câble se déroule en même temps, et ils sont disposés pour manœuvrer aussi bien pour les mouvements des marchandises de la voie d'eau que pour ceux de la voie de terre.

Pour les marchandises de la voie d'eau, des trappes ont été ménagées dans le plancher à chaque étage et au droit de chacun des tire-sacs au milieu de la travée longitudinale de $8^{m}.90$ correspondant au chenal, et les cordages des tire-sacs viennent passer au milieu de ces trappes. Les cordes des tendeurs viennent passer aussi à côté de ces trappes. Au moyen de ces dispositions, on effectue le déchargement d'un bateau en opérant sur quatre points à la fois. Un homme placé à chacune des trappes à l'étage où l'on doit emmagasiner les marchandises suffit pour diriger avec les tendeurs les mouvements du tire-sacs qu'il a à manœuvrer. Des ouvriers placés dans le bateau font le mesurage des grains et les mettent en sacs; d'autres ouvriers reçoivent les sacs dans les étages supérieurs, les pèsent et

les vident, de sorte qu'en définitive, le déchargement, le mesurage. le pesage et la mise en couche ont lieu en même temps.

Pour les provenances de la voie de terre, on adopte des dispositions à peu près analogues. Ainsi quatre grandes baies d'une largeur libre de $1^{m}.50$ s'élèvent sur la façade de la cour de service, depuis le sol du rez-de-chaussée jusqu'au dernier étage. Ces baies sont placées de même au droit des tire-sacs comme les trappes intérieures. Les cordages des tire-sacs viennent passer à l'extérieur dans l'axe de ces baies, et les cordes des tendeurs sont aussi reportées à côté d'elles à l'intérieur. On peut donc effectuer des déchargements ou des chargements de marchandises sur voitures sur quatre points à la fois à l'un quelconque des étages, et un homme placé près la baie de service à l'étage où doit se faire le mouvement suffit encore pour manœuvrer chacun de ces tire-sacs.

On pouvait craindre que ces grandes baies droites et dont les côtés sont revêtus de pièces de bois verticales ne vinssent couper d'une manière nuisible les murs d'enveloppe du magasin; mais on a remédié à cet inconvénient en plaçant à chaque étage des linteaux qui sont engagés dans l'intérieur de ces murs de $0^{m}.40$ à $0^{m}.50$, et qui sont reliés à la maçonnerie au moyen de tirants en queue de carpe de fortes dimensions.

Les voitures entrent dans la cour de service correspondant à ces baies par la grille attenant au pavillon du concierge, et viennent sortir par celle attenant au pavillon des bureaux de l'administration. C'était encore une condition à remplir pour régulariser le mouvement de ces voitures et faciliter le contrôle des papiers à remettre ou à recevoir de leurs conducteurs.

Dans le bâtiment principal, trois grands escaliers, placés dans les encoignures Nord-Est, Sud-Est et Sud-Ouest, assurent le service intérieur.

Le magasin principal, avons-nous dit, a 59 mètres de longueur sur une largeur de $35^{m}.80$ hors œuvre, et il présente ainsi une superficie de $2,112^{mq}.20$, laquelle, en déduisant l'épaisseur moyenne

des murs, se réduit à . . . . . 1,960^{mq}

La superficie totale intérieure, composée de sept sols, le rez-de-chaussée et six planchers, est donc de . . 13,720^{mq}

Déduisant un quart environ pour la surface du chenal au rez-de-chaussée, l'emplacement des machines et les chemins de service, il reste en surface libre pour le magasinage. . . . . 10,000^{mq}

Ce qui permet l'emmagasinage de 100,000 hectolitres de blé empilé à 1 mètre de hauteur. C'est l'approvisionnement de Paris et de la banlieue pour douze jours, car la consommation journalière y est en moyenne de 3,000 sacs de farine, correspondant à 8,500 hectolitres de blé.

On peut juger ainsi des ressources que pourrait présenter cet établissement dans les cas de guerre ou de disette, et combien ces ressources seraient complètes si plus tard on élevait un second magasin semblable sur l'autre terre-plein disposé et réservé à cet effet.

Machine d'épuration. — Pour compléter enfin les dispositions nécessaires à un magasin de cette importance et de cette spécialité, on a établi dans l'encoignure Nord-Est à l'intérieur une machine d'épuration dite machine Maupeou.

Cette machine sert principalement à laver les grains, à les sécher promptement sous une température assez élevée, et à les refroidir presque immédiatement. Les grains passent à cet effet dans des tonneaux-lavoirs placés au premier étage du bâtiment; ils y sont passés à plusieurs eaux en leur imprimant un mouvement rapide au moyen de palettes fixes et mobiles, et ils descendent en s'égouttant au rez-de-chaussée, après avoir été purgés de toutes les matières légères qu'ils contenaient. Ils sont repris au rez-de-chaussée par des chaînes à godets qui les élèvent dans les étages supérieurs pour y être reçus dans une série de cylindres bluttoirs superposés, placés dans une cheminée à air chaud et mis en communication entre eux, de telle sorte que les grains passent successivement de l'un dans l'autre jus-

qu'à ce qu'ils soient descendus de nouveau jusqu'au rez-de-chaussée. On les reprend encore pour les remonter dans les étages supérieurs et les faire passer dans une cheminée à air froid de la même manière que dans la cheminée à air chaud, et cette fois on les reçoit dans les sacs pour les reporter dans le magasin, aux cases qui leur sont assignées.

Vingt minutes suffisent pour toute cette opération, à laquelle contribue la machine à vapeur en imprimant le mouvement aux diverses parties et accessoires de la machine principale.

On peut recevoir ainsi dans le magasin des blés et d'autres grains avariés ou mouillés, et en les soumettant à la machine d'épuration, non seulement on les rétablit dans leur situation normale, mais on les remet encore dans un bon état de conservation, car le lavage et le séchage immédiat, produit par une ventilation rapide et successive d'air chaud et d'air froid, anéantissent les œufs de charançons et de papillons, et font disparaître le germe des autres maladies qui peuvent les attaquer. Les limites de cette note ne nous permettent pas d'entrer dans de plus longs détails sur les avantages et la confection de cette machine, détails qui ont fait d'ailleurs l'objet de diverses notes spéciales de M. de Maupeou et des diverses Sociétés savantes à l'examen desquelles cette machine a été soumise.

Pont roulant. — Les mêmes limites dans lesquelles nous devons nous renfermer pour cette note ne nous permettent pas non plus de donner tous les détails de la construction du pont roulant en fonte qui rétablit en tête du chenal les communications pour le halage.

Note sur la pénétration des bois par des sels métalliques,

PAR M. GOSCHLER.

(Extrait des Annales de la Société des Ingénieurs autrichiens.)

Exposé. — Depuis quelques années l'industrie a reconnu l'impérieuse nécessité de mettre dans la consommation du bois la plus stricte économie, et de chercher par tous les moyens possibles à préserver cette précieuse matière de la destruction spontanée, à en augmenter la durée, à en réduire l'emploi.

Nous allons examiner dans cette note les méthodes les plus propres à préserver la matière ligneuse de la pourriture, en insistant principalement sur leur application à la conservation des traverses de chemins de fer. — Un savant chimiste français, M. Payen, a démontré que le tissu cellulaire du bois, qu'il a nommé *cellulose*, renferme, entre autres principes immédiats, une matière azotée, très facilement altérable. Il a encore prouvé, et avec lui plusieurs chimistes allemands et anglais, que le tissu cellulaire, la matière ligneuse du bois, possèdent à un haut degré la propriété d'entrer en fermentation, c'est-à-dire de pourrir, si on les met en contact avec un corps azoté, sous l'influence de l'air et de l'eau, même à une basse température.

Ainsi la question principale de la conservation des bois, c'est la neutralisation des substances azotées contenues dans le tissu cellulaire. Pour atteindre ce but, on doit employer les réactifs déjà reconnus les plus propres à la conservation des matières animales.

Les sels métalliques, par leur combinaison avec les substances azotées, sont les plus convenables pour arrêter la décomposition des corps, ou l'annihiler complétement. Parmi ces agents, ceux qui se combinent le plus directement sont : le sublimé corrosif, — les com-

binaisons du cuivre, — du fer, — du zinc, — du manganèse, avec l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique. — La facilité qu'ils ont de cristalliser, d'être solubles dans l'eau, permet de les introduire à l'état liquide dans les corps poreux.

Lorsqu'il s'agit du bois, l'action des réactifs les plus propres à sa conservation consiste dans leur combinaison avec la matière azotée, produisant par là un corps inerte insoluble. Cette matière azotée absorbe toute la quantité du réactif dont elle a besoin pour sa neutralisation complète, tandis que l'excès du sel employé se dépose dans les vides du tissu ligneux.

Le bois préparé suivant cette méthode, et exposé à l'action prolongée de l'air et de l'humidité, peut encore subir l'influence de la décomposition spontanée. En effet, le dépôt de sel cristallisé dans les vides, principalement vers les surfaces externes, sera peu à peu enlevé par un lessivage continuel. Dès lors, une partie du tissu cellulaire sera de nouveau soumise aux influences délétères, mais extérieures, cette fois. Celles-ci proviennent en grande partie de la facilité que trouvent les insectes à se loger dans les vides du bois, où ils cherchent, soit leur nourriture, soit un abri.

Ces animaux, très azotés eux-mêmes, offrent au tissu cellulaire, par la putréfaction de leurs cadavres, une nouvelle source de décomposition.

De tout cela il résulte que l'injection d'un sel simple ne suffit pas pour préserver le bois : car tout sel cristallisable simple est plus ou moins soluble dans l'eau. L'effet que nous venons de mentionner se reproduira toujours dans des circonstances analogues.

Il est donc nécessaire, nous dirons même indispensable, de compléter la pénétration du bois par l'introduction d'un second sel dont la réaction sur le premier forme un précipité insoluble dans l'eau, qui comble les vides et recouvre les surfaces.

On voit immédiatement la profonde différence qui existe entre les procédés à injection simple et ceux à injections multiples. C'est pour avoir méconnu les diverses causes en jeu dans la pourriture des

bois que les anciens procédés ont manqué le but proposé et n'ont pas répondu aux espérances fondées sur leur emploi.

Une cause plus grave et non moins vraisemblable de ces insuccès gît encore dans l'hypothèse, admise alors, que la capillarité ou simplement la pression atmosphérique suffisait pour introduire dans des espaces pleins d'air une dissolution plus ou moins saturée. Selon nous, il est impossible d'atteindre ce résultat. En tout cas, pour donner quelque valeur à cette opération, il est indispensable de purger le bois de l'air qu'il contient, et d'introduire la dissolution du sel sous une pression de plusieurs atmosphères.

Pour purger d'air le bois à conserver, il faut le placer dans un appareil propre à faire le vide. Cette opération est plus parfaite par la condensation de la vapeur d'eau que par le jeu de pompes pneumatiques, sujettes aux rentrées d'air, et dont l'emploi demande beaucoup de temps et de force, coûte par conséquent plus cher que celui de la vapeur dans les mêmes circonstances.

— La conservation d'une pièce de bois *exposée sur le sol à l'air libre* exigeant absolument une double injection de sels métalliques différents, introduits de manière à produire dans l'intérieur du bois un précipité insoluble, on peut se demander si, la première injection opérée, on soumettra le bois ainsi préparé à une dessiccation, ou bien si on l'imbibera immédiatement de la seconde dissolution.

Nous croyons qu'il est plus convenable de sécher le bois après la prémière pénétration, car le sel déjà introduit forme un premier dépôt dans les vides, dépôt que la seconde dissolution détrempe sans difficulté aux points où la réaction doit se faire et la précipitation s'opérer.

Si, au contraire, la seconde injection suit immédiatement la première, elle ne peut plus avoir lieu après une nouvelle raréfaction d'air, car évidemment la dissolution déjà injectée et encore liquide tend à sortir du bois par l'action du vide qui se fait autour de la pièce soumise à la préparation. Dès lors, la saturation du tissu cellulaire, la couverte des surfaces internes, n'est qu'imparfaite.

— La série suivante d'opérations diverses constitue le procédé que nous proposons pour imprégner et conserver les traverses de chemins de fer.

— Placer le bois, coupé en hiver et desséché, dans un cylindre fermé, bien étanché.

— Faire arriver dans ce cylindre de la vapeur d'eau pour en chasser l'air.

— Condenser cette vapeur pour produire le vide.

— Introduire la première dissolution, pendant une heure environ, sous une pression de quatre atmosphères effectives, au moyen d'une pompe à main.

— Soutirer du cylindre le liquide en excès.

— Enlever le bois et le sécher rapidement.

— Replacer le bois dans un second cylindre, où il reçoit de la même manière l'injection du second sel.

— Retirer le bois, le dessécher lentement, d'abord pendant quelques jours sous un hangar, puis à l'air libre.

— Nous basant sur les principes que nous venons de rappeler, nous avons cherché à déterminer : 1° quels seraient, en Autriche, les sels les meilleurs et à meilleur marché que l'on pourrait utiliser à la conservation des bois ; 2° quelle quantité de sels, en poids, on devrait employer par pied cube de bois (en prenant le rapport des espaces pleins aux vides) ; 3° quel en serait le prix de revient.

Parmi tous les sels métalliques, les sulfates métalliques sont ceux que l'on rencontre le plus généralement sur toute la terre, en Autriche particulièrement. Leur bas prix relatif et leur remarquable affinité pour les corps azotés militent encore en leur faveur et contribuent à les faire prendre pour base de notre méthode. — J'ajoute que les sulfates métalliques ne donnent de précipités insolubles qu'avec le sulfure de calcium et le sulfure de barium, deux corps faciles à produire à bon marché.

Il reste dès lors à déterminer le sel sur lequel nous fixerons notre choix pour l'appliquer avec avantage au but proposé.

En Autriche, les sulfates que fournit le commerce sont :

Le sulfate de manganèse (SO^3MnO), vitriol de manganèse.

Le sulfate de fer (SO^3FeO), vitriol ferreux.

Le sulfate de zinc (SO^3ZiO), vitriol de zinc.

Le sulfate de cuivre (SO^3DuO), vitriol de cuivre.

De ces quatre sels, celui de manganèse mérite la préférence sur tous les autres, tant sous le rapport chimique que sous celui du prix.

En effet, ce sel est neutre (c'est-à-dire ne contient d'acide que la quantité correspondante à l'oxyde), avantage que n'offrent pas toujours les vitriols de fer ou de cuivre du commerce, dans lesquels on trouve ordinairement un excès d'acide sulfurique. L'emploi de ces sels exige une neutralisation préalable, sans quoi ils exerceraient une action nuisible sur la fibre ligneuse.

En second lieu, ce sel produit dans les fabriques de chlore sous forme de dissolution passablement concentrée, ne trouvant jusqu'ici qu'un emploi très restreint, doit être, en grande partie, rejeté et perdu pour le fabricant. A Vienne, le sulfate neutre de manganèse, solide, peut être livré au prix de 2 florins, ou au plus 2 florins 30 kreutzer par quintal.

Enfin, c'est l'un des sels applicables à la conservation des bois pour lesquels il n'a pas été pris de patente. Cette considération a quelque importance, quoique le procédé décrit dans cette note n'ait pas à craindre le reproche de contrefaçon.

Vient ensuite le vitriol ferreux ou sulfate de fer, produit en grandes masses par les fabriques d'acide sulfurique, qui peuvent le livrer à un prix assez modéré. A Vienne, le quintal de ce sel, solide, coûte 3 florins 30 kreutzer. Les sulfates de zinc ou de cuivre coûtent beaucoup trop cher pour que leur emploi puisse être avantageux dans le cas dont il s'agit. Le quintal de sulfate de cuivre solide, livré à Vienne, ne se vend pas moins de 23 florins. — Nous avons remarqué plus haut que nous devions employer un sulfure de calcium ou de barium pour former avec les sulfates un précipité insoluble dans l'eau. Ici le sulfure de calcium sera préféré au sulfure de barium,

dont le prix est assez élevé. Le premier, produit secondaire et inutile des usines à gaz, est abandonné et rejeté. Ces usines se feraient un plaisir de le livrer pour rien.

Dès lors, le quintal de sulfure de calcium ne coûterait que les frais de transport et de purification. Cette opération se ferait par un lessivage à l'eau chaude, qui déposerait le sel des parties terreuses contenues dans le lait de chaux qui a été soumis au courant du gaz d'éclairage. On peut admettre que tous frais à faire sur le sulfure de calcium, rendu, purifié, monteront au plus à la somme de 1 florin.

Déterminons maintenant les proportions à prendre des sels dont nous nous occupons. Le sulfate de manganèse, représenté par l'expression SO^5MnO, et le sulfure de calcium par l'expression SCa, donnent, par leur combinaison,

$$SO^3MnO + SCa = SO^3CaO + SMn,$$

c'est-à-dire du sulfate de chaux et du sulfure de manganèse, tous deux insolubles dans l'eau.

En nous rapprochant des nombreux essais faits dans différents pays, nous trouvons que l'on prend *une* partie en poids de sel métallique pour *vingt* parties d'eau. Pour nous prémunir contre une évaluation trop faible, nous prendrons *une* partie de sulfate de manganèse pour *dix* parties d'eau en poids.

Déterminons maintenant la quantité de dissolution que peut absorber le bois. D'après plusieurs expériences faites avec beaucoup de soin par le chimiste anglais *Marcus Bull*, l'unité de volume de bois de diverses essences contient 0,54 d'espaces pleins et 0,46 d'espaces vides. Ainsi 1 pied cube de bois peut absorber $0{,}46 \times 56^{liv},5$ (1) $= 26$ liv. Or 10 livres d'eau contenant 1 livre de sel de manganèse, un pied cube de bois peut prendre $\frac{26}{10} = 2^{liv},6$ de sulfate de manganèse.

---

(1) Le pied cube d'eau pèse $56^{liv},5$.

Introduites dans un pied cube de bois, ces $2^{liv},6$ de sulfate de manganèse absorberont autant de parties en poids de sulfure de calcium que l'indique l'affinité chimique des deux corps.

Prenant pour unité le poids atomique de l'hydrogène, on sait que

l'oxygène a pour poids atomique	. . .	8
le soufre	id. . . .	16
le calcium	id. . .	20
l'acide sulfurique	id. . . .	40
le manganèse	id. . . .	27

Le poids du sulfate de manganèse est donc

$$SO^3MnO+4HO=75+36=111,$$

et celui du sulfure de calcium

$$SCa=36.$$

Ainsi 111 livres de sulfate de manganèse exigent 36 livres de sulfure de calcium pour produire des précipités insolubles dans l'eau. Donc les 2,6 livres trouvées plus haut demanderont $\frac{36\times 2,6}{111}=0,85$ liv. de sulfure de calcium.

S'agit-il maintenant de connaître le degré de dissolution de ces 0,85 de livres de sulfure de calcium, nous faisons d'abord remarquer que

le sulfate de manganèse	$=SO^3MnO$	a pour poids spécifique	2
le sulfate de calcium	$=SCa$	id.	2,5
l'eau	$=HO$	id.	1

Un pied cube de bois absorbant 2,6 livres de sulfate de manganèse, qui y occupent un espace égal à $\frac{2,6\times 0,54}{56,5}=0,024$ de pied cube, l'espace libre après la première injection et la dessiccation immédiate sera de

$$0,46-0,024=0,416 \text{ de l'unité de volume.}$$

Cet espace devra être rempli de la dissolution de sulfure de calcium contenant $0^{liv},85$ de sulfure,

Le volume du sel est $\frac{0,85 \times 0,41}{56,5} = 0,0062$ de pied cube.

Donc, pour le volume de l'eau à employer, il reste

$$0,416 - 0,0062 = 0,4098,$$

et pour poids

$$0,4098 \times 56,5 = 23,15 \text{ livres d'eau}$$

par pied cube de bois, ou pour 0,85 de livre de sulfure de calcium.

Des chiffres qui précèdent il résulte que, le sulfate de manganèse coûtant 2 florins 30 kreutzer le quintal, les 2,6 livres coûteront

$$\frac{150 \times 2,6}{100} = 3^{kr},9;$$

le sulfure de calcium revenant à 1 florin le quintal, les $0^{liv},85$ reviendront à

$$\frac{60 \times 0,85}{100} = 0^{kr},51.$$

Aussi un pied cube de bois absorbera en sels métalliques une valeur de

$$3^{kr},9 + 0^{kr},51 = 4^{kr},41.$$

Si nous rapportons maintenant les nombres trouvés plus haut à la préparation des traverses de chemins de fer, nous trouvons qu'une traverse, de celles qu'on emploie sur les chemins de fer autrichiens, ayant un volume de 2,8 pieds cubes, absorbera pour

$$2,80 \times 4,41 = 12^{kr},34 \text{ de sels métalliques}$$

en nombre rond 12 1/2 kreutzer

Entrons maintenant dans les détails d'application de la méthode en question. Voici quels sont les appareils nécessaires :

Un cylindre pour imprégner le bois de sulfate de manganèse liquide.

Deux cuves, l'une inférieure, l'autre supérieure au premier cylindre, pour réception de la dissolution de sulfate.

Un petit réservoir renfermant la dissolution *concentrée* de ce sulfate.

Un second cylindre pour imprégner le bois du sulfure de calcium liquide.

Deux cuves pour recevoir la dissolution de ce sulfure.

Un petit réservoir pour la dissolution *concentrée* de ce sel.

Un réservoir pour la purification du sulfure venant des usines à gaz.

Deux pompes foulantes à main pour les cylindres.

Un réservoir pour alimenter d'eau les différentes opérations.

Enfin une chaudière à vapeur.

Les frais d'établissement de ces divers appareils peuvent s'élever à la somme de 10,000 florins, y compris l'achat d'une petite machine à vapeur destinée à pomper les eaux, si cela est nécessaire.

Le nombre d'ouvriers nécessaires aux manipulations indiquées serait de 12, qui coûteraient 8 florins par jour. Ajoutant à ce prix celui de l'intérêt, de l'amortissement et du combustible, qui serait de 4 florins environ, on trouve que l'emploi des appareils coûterait 12 florins par jour.

Or, si l'on admet qu'il faille deux heures pour la pénétration d'un sel, une heure pour les autres manœuvres, avec les appareils énumérés plus haut, on pourrait préparer 256 traverses en douze heures, et par an 95,000.

Le développement actuel des chemins de fer autrichiens étant d'environ 100 milles ou 2,400,000 pieds, et les traverses étant espacées de 3 pieds, d'axe en axe, on voit que les 100 milles de chemin emploient 800,000 traverses.

Année moyenne on remplace 12 p. 100 de ces traverses, soit 96,000. L'établissement décrit ci-dessus suffirait donc à pourvoir, en huit années, au remplacement complet des 800,000 traverses non préparées.

Nous venons de voir qu'on peut préparer 256 traverses en douze heures, travail dont la main d'œuvre s'élève à 12 florins : donc une traverse coûte $\frac{720}{256} = 3$ kreutzer en nombre rond. Ajoutons à ce chiffre le prix des sels injectés = 12 1/2 kreutzer, et nous trouvons pour prix définitif de la préparation d'une traverse

15 1/2 kreutzer, soit 67^{cent},12.

Chaque traverse en chêne coûte à l'état 1 florin 25 kreutzer en moyenne, et dure cinq années environ. La préparation de cette traverse en porterait le prix à 1 florin 40 kreutzer, et lui donnerait une durée quadruple.

En tablant seulement sur une durée double de celle actuelle, les traverses durant cette période occasionneront une dépense de

$$\frac{800,000 \times 100}{60} = 1,333,333 \text{ florins},$$

tandis que les traverses non imprégnées coûteraient, dans le même laps de temps,

$$\frac{2 \times 800,000 \times 85}{60} = 2,266,666 \text{ florins.}$$

Ainsi l'emploi des traverses imprégnées procurerait une économie de 40 p. 100 des capitaux engagés.

Mais il y a plus encore. La pénétration du bois procure l'immense avantage de permettre la substitution des traverses en sapin aux traverses en chêne.

Les traverses en sapin coûtent, non imprégnées, 45 kreutzer, et imprégnées, 1 florin. Admettant une durée moyenne de dix ans pour cette essence, l'emploi de ces traverses procurerait une économie de 64 p. 100, résultat qui ressortirait plus avantageux encore si nous n'avions pas taxé tous les frais de préparation à un chiffre plus élevé qu'ils ne peuvent l'être dans la pratique.

En présence de ces conclusions, il est à souhaiter que la prépara-

tion des bois dans l'établissement des chemins de fer se répande et se généralise dans le plus bref délai possible.

J. POLLACK,
Ingénieur des chemins de fer de l'Etat.

Les mesures et valeurs citées dans cette note ont, avec les mesures et valeurs françaises correspondantes, les rapports suivants :

1 klafter = 6 pieds — 1^{m},8962.
1 pied linéaire = 0^{m},316.
1 pied carré = 0^{mq},0999.
1 pied cube = 0^{mc},0,31568.
1 quintal = 100^{liv} = 56^{kil},0.
1 livre = 32 loth = 0^{kil},5601.
1 florin = 60 kreutzer = 2 fr. 60 cent.

Note sur les procédés de conservation du bois (1),

PAR M. A. SCHWEITZER,

Ingénieur de la voie aux chemins de fer hanovriens,

Analysée par M. FERDINAND MATHIAS.

L'auteur insiste d'abord sur l'importance de cette question, dont la solution diminuerait les dépenses d'une foule d'industries, et tendrait à maintenir l'équilibre entre la production et la consommation, équilibre que l'établissement et l'entretien des voies ferrées contribuent puissamment à détruire.

Il dit ensuite que la fibre ligneuse est très peu sujette à la pourriture, et que ce phénomène est dû principalement à la sève, qui obéit à la tendance générale des corps organiques à former des composés plus simples sous l'influence d'agents extérieurs. C'est l'action de l'air, favorisée ou retardée par des circonstances locales, qui fait entrer la sève en fermentation putride; dans cet état, elle attaque fortement la fibre ligneuse, et produit ce qu'on appelle la pourriture du bois.

Les conditions nécessaires pour provoquer la fermentation de la sève sont les suivantes :

Cessation de la vie végétale, accès de l'air, humidité et chaleur modérée au dessus de 0° et au dessous de 50°.

Pour arriver à une conservation parfaite du bois, il faudrait donc en extraire complètement la sève. Quoique ce résultat soit impossi-

---

(1) Cette note a été publiée dans le Journal de la Société des architectes et ingénieurs du royaume de Hanovre, et reproduite dans le Journal de la Société des ingénieurs autrichiens du mois d'avril 1852

La première partie est analysée; la deuxième est traduite en entier.

ble à obtenir dans la pratique, on a néanmoins mis en usage divers procédés d'extraction.

D'abord, on a choisi pour l'abattage des arbres l'époque à laquelle ils contiennent le moins de sève, c'est-à-dire l'hiver; en les laissant garnis de leurs branches jusqu'au printemps, la pousse des feuilles dépouille encore le tronc d'une quantité notable de sève. On peut aussi, avec avantage, entailler les arbres sur pied ou leur enlever l'écorce.

Outre la dessiccation, dont l'effet est peu durable, les procédés d'extraction de la sève consistent dans l'emploi soit de l'eau, froide ou bouillante, soit de la vapeur.

L'eau dissout, la vapeur volatilise, et, comme les substances contenues dans la sève sont plus solubles que volatiles, l'action de l'eau paraît préférable en théorie; mais son emploi exigerait beaucoup de temps ou de frais, et d'ailleurs la vapeur a l'avantage de faire coaguler l'albumine, qui dès lors n'est plus soumise à la fermentation putride.

Toutes les méthodes d'extraction sont donc basées aujourd'hui sur l'action de la vapeur, et il faut remarquer que les résultats sont plus favorables lorsqu'on opère sur des bois abattus pendant la montée de la sève : la précaution relative à l'époque de l'abatage ne serait donc pas applicable dans ce cas.

Certains autres procédés ont pour but de préserver de la fermentation la sève des arbres non préparés, ou bien d'empêcher les résidus de la sève évaporée d'attirer l'humidité de l'air, et de former une dissolution fort semblable à la sève même. Ainsi, on a enduit les bois d'huile, de goudron, de poix, d'asphalte, et en dernier lieu de silicate de soude, sans avoir pu obtenir des résultats satisfaisants.

On réussit mieux en flambant le bois, surtout lorsque l'opération peut être pratiquée sur toute la surface de la pièce. Le bois se dessèche, l'albumine est coagulée, et la couche de charbon s'oppose au contact de matières étrangères en fermentation.

L'immersion du bois dans une dissolution de sel, de salpêtre, d'a-

lun ou de vinaigre de bois, a été pratiquée également. Ces corps enlèvent l'eau aux matières organiques de la sève, s'y substituent, et pénètrent dans les pores. C'est ainsi que dans les ateliers de la marine française on a l'habitude de tenir les mâts plongés dans la mer.

Tous ces procédés n'empêchent ni l'absorption de l'humidité ni l'action de l'oxygène de l'air. On a donc abandonné cette voie, et l'on a cherché à introduire dans le bois des substances qui pussent le préserver de la fermentation, quoiqu'il soit exposé à toutes les influences défavorables dont il a été question. Le mode d'action de ces substances est encore peu connu; quelques unes d'entre elles se combinent avec certaines matières organiques, d'autres paraissent n'agir que par leur seule présence. Un grand nombre coagule probablement l'albumine, et les acides minéraux forment avec elle des combinaisons insolubles et résistant à la fermentation.

L'introduction dans le bois de ces matières conservatrices a lieu soit par une forte pression exercée sur la dissolution dans laquelle est plongée la pièce débitée, soit par l'absorption du liquide pressé autour des racines de l'arbre sur pied.

Parmi toutes les substances antiseptiques propres à l'usage indiqué, l'expérience a fait choisir les cinq suivantes, parce qu'elles sont ou peu chères, ou faciles à appliquer, ou bien d'un effet très énergique.

1° *Sulfate de fer.* — Employé sur les chemins de fer belges et sur quelques chemins français pour la préparation des traverses.

2° *Sulfate de cuivre.* — Employé sur les chemins de Berlin à Stettin, de Berlin à Hambourg, et de Magdebourg à Wittenberg. La dissolution contient 3/40 de sulfate.

3° *Bichlorure de mercure* (sublimé corrosif). — Fréquemment employé en Angleterre. Beaucoup de tableaux sur bois très anciens, couverts au dos d'une couche de cette substance, ont été préservés complétement de la pourriture, des vers et des insectes.

4° *Chlorure de zinc.* — Employé sur le chemin de Magdebourg à Wittenberg pour la préparation des poutres de pont, et sur les che-

mins saxo-bavarois, hanovriens, et d'Aix-la-Chapelle à Maestricht, pour les traverses.

Les poteaux de la ligne télégraphique de Brême au Port-de-Brême ont été préparés au chlorure de zinc, et se sont parfaitement conservés, tandis que d'autres poteaux en chêne, flambés à la base, sont déjà pourris et remplacés.

5° *Créosote.* — Employée sur beaucoup de chemins de fer anglais et sur celui de Cologne à Minden. Les viandes fumées, qui se conservent beaucoup plus long-temps que les viandes salées, ne doivent cet avantage qu'aux vapeurs de créosote contenues dans la fumée des combustibles végétaux.

La propriété de cette substance de coaguler fortement l'albumine constitue probablement la cause de son action conservatrice.

La créosote se dissout très facilement dans le vinaigre et dans l'eau à raison d'un et demi pour cent.

En Suisse, on paraît avoir le projet de préparer les traverses en les flambant avec des broussailles, espérant sans doute un effet avantageux des vapeurs de créosote. Ce procédé est en tout cas préférable à celui qui consiste à ajouter du goudron à l'eau produisant la vapeur destinée à agir sur le bois.

En France, on s'est aussi occupé de quelques acétates; mais les résultats en ont été peu favorables.

La valeur relative de ces divers ingrédients n'a pas encore été bien déterminée. La créosote et le sublimé corrosif paraissent avoir l'action la plus énergique; mais l'expérience seule décidera s'ils peuvent rivaliser, sous le rapport du prix, avec le sulfate de cuivre, et surtout avec le chlorure de zinc.

L'auteur cite ici quelques expériences de Boucherie, communiquées à l'Académie des sciences, et qu'il est inutile de reproduire.

Toutes les substances dont il vient d'être question sont solubles, et par conséquent on peut craindre que les bois en contact avec de l'eau, ou seulement avec de la terre humide, n'en soient dépouillés à la longue. Cet inconvénient a fait naître récemment une nouvelle

méthode, dont le but est de fermer complétement les pores du bois, et de s'opposer ainsi à l'accès de l'air, de l'humidité et de matières putrides. C'est une espèce de pétrification artificielle du bois, combinée avec l'introduction de substances antiseptiques.

Le premier moyen proposé fut l'emploi d'une dissolution de carbonate de chaux. Ce sel, arrivé dans l'intérieur du bois, devait y perdre son eau, absorber l'acide carbonique de l'air, et se convertir en pierre calcaire. Mais il est très difficile de faire pénétrer dans le bois une quantité suffisante de ce lait de chaux; le carbonate n'y durcit pas complètement, et d'ailleurs il attaque la fibre ligneuse.

L'immersion du bois dans une dissolution chaude de silicate de soude est une opération coûteuse, peu expérimentée jusqu'à présent.

Au chemin de fer de Cologne à Minden on a immergé les bois d'abord dans une dissolution de sulfure (ou de chlorure) de barium, puis dans un bain de sulfate de fer. Il se forme du sulfure de fer et du sulfate de baryte, ce dernier remplit les pores du bois, et le sulfure de fer, se convertissant peu à peu en sulfate, agit comme corps préservateur.

Cette méthode est assez chère, 1 fr. 6 c. par traverse, et ne paraît pas devoir remplir le but, car le sulfate de baryte, au lieu de se précipiter à l'état de poudre, forme d'assez gros cristaux.

Il faut donc choisir d'autres corps. Peut-être réussirait-on avec le chlorure de calcium et le sulfate de soude. Il se formerait du sulfate de chaux pulvérulent et du chlorure de sodium. Les sels proposés sont beaucoup moins chers que ceux indiqués plus haut, et, à moins de difficultés imprévues dans la pratique, le procédé serait plus efficace et plus économique.

Il est facile de prévoir d'ailleurs qu'on trouvera beaucoup d'autres combinaisons propres à cette pétrification chimique du bois.

PROCÉDÉ EMPLOYÉ SUR LES CHEMINS DE FER DU HANOVRE.

La préparation à laquelle on soumet les traverses à la gare de Ha-

novre, et sur plusieurs autres points des lignes en construction, consiste dans l'extraction de la sève par la vapeur, suivie d'une saturation par le chlorure de zinc dissous dans l'eau.

La chaudière destinée à recevoir les traverses est un cylindre en tôle de 9m.930 de longueur sur 1m.750 de diamètre, et terminé par des calottes semi-sphériques. Les nouveaux appareils se composent de deux de ces chaudières contiguës, dont l'une est en chargement pendant que l'autre fonctionne. Les traverses, convenablement disposées sur de petits chariots en fer construits pour cet usage, arrivent au moyen d'un petit chemin de fer jusque dans l'intérieur de la chaudière. Le chargement complet est de 140 à 150 traverses ayant 2m.337 de longueur sur 0m.292 de largeur et 0m.146 d'épaisseur.

Dès que la chaudière est remplie de traverses et la porte hermétiquement fermée, on introduit pendant quatre heures de la vapeur à 2 et 2 3/4 atmosphères. Toutes les demi-heures on ouvre le robinet d'un tuyau partant du bas de la chaudière, et l'on évacue ainsi la vapeur condensée et la sève extraite du bois. La liqueur qui s'écoule est tiède et fortement colorée en noir, par suite de la combinaison de l'acide gallique du bois avec l'oxyde de fer de la chaudière.

L'opération terminée, on met en mouvement une machine à vapeur placée près de l'appareil, et l'on fait dans la chaudière un vide aussi complet que possible, soit de 54 centimètres environ.

L'air qui s'échappe est saturé de gaz produit par quelques substances contenues dans la sève, dont le vide facilite la volatilisation ; il assure d'ailleurs une pénétration énergique du chlorure de zinc.

En effet, dès que le vide est établi, on ouvre la communication avec de grands réservoirs enterrés à côté des chaudières, et renfermant la dissolution de chlorure. La pression atmosphérique fait remplir la chaudière, et l'on y introduit immédiatement de la vapeur qui met le liquide en ébullition. On parvient ainsi à coaguler complétetement l'albumine, et à extraire les parties solubles de la sève.

Après une heure d'ébullition, on fait entrer dans la chaudière de nouvelles quantités de chlorure de zinc au moyen d'une pompe pui-

sant dans les réservoirs. Cette pompe est mue par des hommes à la gare de Hanovre, et par une machine à vapeur dans les nouveaux établissements. La pression exercée et limitée par une soupape de sûreté est de 8 à 10 atmosphères.

On laisse agir la pompe pendant quatre à cinq heures ; mais, toutes les fois que la pression maxima a été atteinte, on arrête quelques instants pour laisser l'absorption s'effectuer convenablement.

Enfin l'on vide la chaudière, et la dissolution retourne dans les réservoirs, et, après décantation du liquide provenant de la sève, elle sert à l'opération suivante.

La dissolution se compose de trente parties d'eau et d'une partie de chlorure de zinc, d'une densité de 1.80 à 1.85, renfermant 28 à 31 p. 100 de zinc métallique.

Sous une pression de 8 à 10 atmosphères, les bois blancs, surtout le hêtre et le peuplier, sont complétement pénétrés de chlorure, de telle façon qu'une traverse sciée présente deux sections tout à fait humides. Pour le chêne, la même pression est insuffisante ; l'introduction du liquide n'a lieu, pour ainsi dire, que par les bouts, car les fibres longitudinales ne le laissent guère pénétrer qu'à 6 millimètres de profondeur. En sciant une traverse de chêne, on voit que la dissolution a passé entre les anneaux (ou couches concentriques), qui eux-mêmes sont restés secs. Ce fait, qui a lieu aussi bien pour le sulfate de cuivre que pour toute autre dissolution, n'a rien d'étonnant : car on sait que Boucherie a vainement essayé, sous une pression double, de faire pénétrer un liquide jusqu'au cœur de morceaux de chêne de plus petites dimensions que des traverses de chemin de fer.

Les traverses préparées comme il vient d'être dit perdent rapidement à l'air l'eau qu'elles ont absorbée. Immédiatement au sortir de la chaudière, celles en hêtre ont donné un excédant de poids de 11^{k}.773 ; pour celles en chêne, l'augmentation a été de 8^{k}.250 à 8^{k}.275.

Les traverses en hêtre de 2^{m}.337 sur 0^{m}.292 et 0^{m}.146 ont ab-

sorbé par pièce 22^{litres}.5, de liquide, ce qui, d'après les proportions indiquées ci-dessus, correspond à 1^{k}.355 de chlorure de zinc.

Une traverse en chêne de même dimension absorbe 10^{litres}.84, contenant 0^{k}.705 de chlorure.

Les frais de préparation sont de 4 fr. 91 c. par mètre cube de bois de chêne, ou de 49 centimes par traverse. Si l'on y ajoute les prix de l'appareil et d'un établissement assez considérable de voies, etc., on trouve, en répartissant la dépense sur 40,000 traverses, que le prix de revient est de 8 fr. 25 c. par mètre cube, ou de 82 centimes par traverse.

Note sur la résistance des wagons à freins et sur le frottement de glissement,

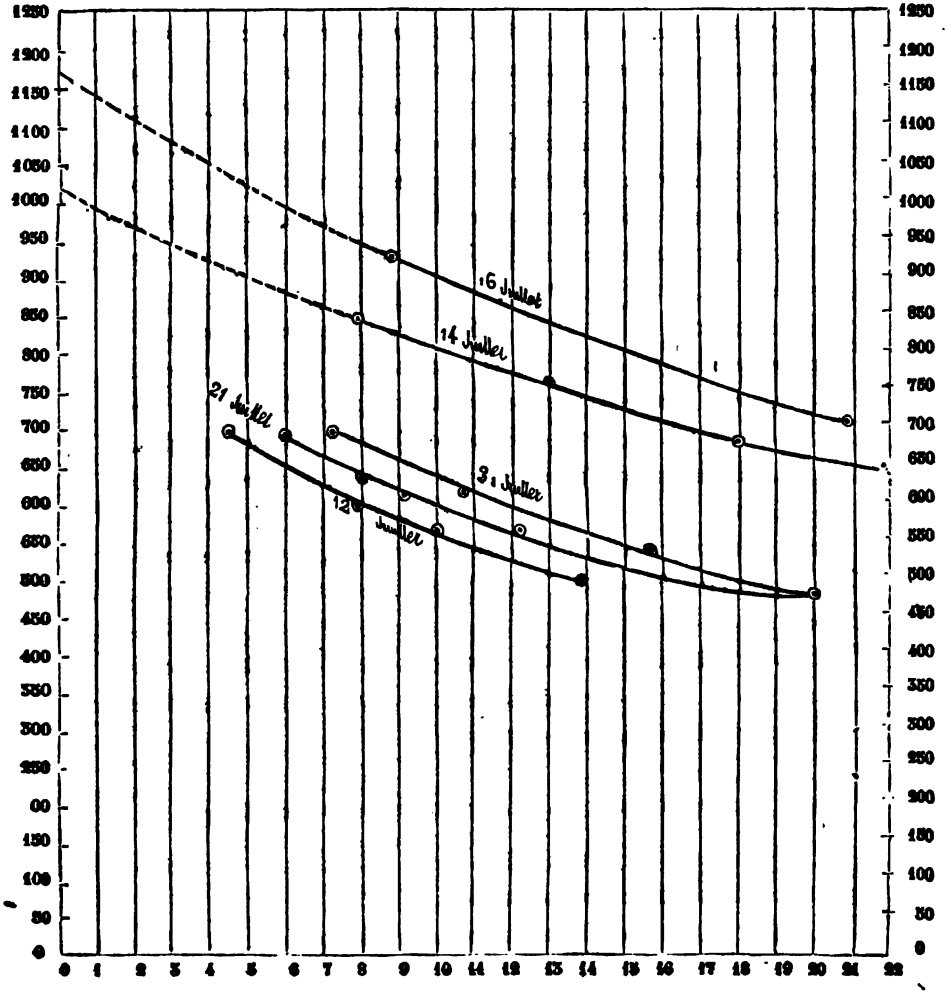
PAR M. J. POIRÉE

Ingénieur des ponts et chaussées.

Récapitulation des expériences faites sur le tirage des wagons à freins marchant les freins serrés.

Poids du wagon remorqué. 1	Vitesse de marche en mètres par seconde. 2	Longueurs sur lesquelles le tirage et la vitesse sont restés constants 3	Tirage. 4	Rapport du tirage au poids remorqué. 5	Etat des rails. 6
			12 juillet 1851.		
3,400kil	4.6	500m.	710k.	0.208	Rails secs.
Id.	7.8	800	609	0 179	Id.
Id.	10.0	300	570	0.167	Id.
Id.	14 3	1600	492	0.144	Id.
			14 juillet.		
3,400	7.9	300	839	0.246	Rails très secs. !
Id.	13	300	758	0.222	Id.
Id.	18	1000	690	0.202	Id.
Id.	22	400	637	0.187	Id.
			16 juillet.		
8,400	8.8	1000	930	0.110	Rails humides.
Id.	20.8	750	698	0.083	Id.
			21 juillet.		
3,400	6	400	704	0.201	Rails secs; ils avaient
Id.	8	400	640	0 182	été mouillés le matin.
Id.	9.2	450	615	0.175	Id.
Id.	12.2	500	570	0.162	Id.
Id.	20	700	465	0.136	Id.
			Même jour.		
6,450	9	500	1092	0.169	Id.
			21 juillet.		
3,400	7.25	300	700	0.200	Rails secs; les ressorts
Id.	10.8	850	604	0.172	de suspension de la caisse
Id.	15.7	950	541	0.154	du wagon avaient été
Id.	20	1300	464	0 132	calés.

Représentation graphique des expériences précédentes.



Légende.

Col. 1. Les expériences ont été faites avec des wagons à ballast à quatre roues. Le poids de 3,400 kilogrammes correspond au wagon vide portant deux hommes pour la manœuvre du frein.

Col. 1, 2, 3. Toutes les circonstances de la marche et du tirage ont été données par les indications d'un dynamomètre Morin, placé derrière le tender de la machine employée au remorquage du wagon. On n'a rapporté dans le tableau que les tirages correspondant aux parties de la marche dans lesquelles la vitesse est restée à peu près régulière.

Dans les expériences des 12, 14, 16 et 21 juillet, les ressorts de suspension du wagon étaient libres, et la caisse de ce dernier éprouvait dans les grandes vitesses des oscillations très marquées. Dans l'expérience du 31 juillet, les ressorts ayant été calés, le wagon glissait sur les rails comme un traîneau, sans aucune espèce de mouvement d'oscillation.

Aux démarrages et dans les petites vitesses, le tirage s'opérant par à-coups très brusques, il était impossible de faire une opération régulière.

Le wagon à ballast employé aux expériences étant bas et entièrement caché par la caisse du dynamomètre, on n'a pas cru devoir tenir compte de la résistance de l'air.

Représentation graphique des expériences précédentes.

Les vitesses sont portées sur la ligne des abscisses à raison de $0^m.005$ par mètre de vitesse par seconde.

Les tirages correspondants sont portés sur les ordonnées verticales à raison de $0^m.001$ par 10 kilogrammes.

Conclusion.

Les expériences qui précèdent, quoique peu nombreuses, sont

assez concordantes pour que l'on puisse en tirer les conclusions suivantes :

La résistance des wagons à freins est proportionnelle au poids des wagons ; elle peut varier suivant l'état des rails du simple au double, soit, environ, pour les petites vitesses, de 0.11 à 0.25 du poids remorqué.

La résistance des wagons à freins diminue à mesure que la vitesse de marche augmente. Dans les limites de poids et de vitesses usuelles, la diminution de résistance résultant de l'augmentation de la vitesse est à peu près indépendante du poids des wagons et de l'état des rails ; elle peut être représentée par la fonction suivante de la vitesse :

$$25v - 0{,}35v^2$$

et par suite la résistance des wagons à freins serait donnée par la formule

$$f = kP - 25v + 0.35v^2,$$

P étant le poids du wagon,

k étant un coefficient constant, variable seulement avec l'état des rails. On peut employer approximativement

$k = 0.13$ pour des rails humides,

$k = 0.30$ pour des rails très secs.

La formule ne devant d'ailleurs être appliquée que pour des vitesses comprises entre 5 et 22 mètres.

Note sur le frottement de glissement.

Il est admis comme règle que le frottement de glissement est indépendant de la vitesse des corps frottants. Cette loi, établie par des expériences où les vitesses étaient comprises dans des limites assez restreintes, se maintiendrait-elle pour des vitesses beaucoup plus élevées ? Il est permis d'en douter : tel est au moins d'une manière assez générale le sentiment des praticiens, et les expériences que nous venons de rapporter confirment ces doutes. On a vu en effet que le tirage des wagons à freins, glissant sur la voie comme des traîneaux,

diminuait à mesure que leur vitesse augmentait; mais il faut bien remarquer qu'en raison de la discontinuité de la voie, le traîneau éprouvait à chaque joint de rails des chocs d'autant plus vifs que la vitesse était plus grande; et ces chocs devaient amener des pertes de force et augmenter le tirage. Le frottement de glissément diminuerait donc quand la vitesse des corps frottants augmente, et cette diminution serait plus rapide que celle qui est donnée par la formule précédente pour les wagons à freins.

Les observations présentées lors de la discussion des conclusions de la note qui précède ont porté principalement sur cette circonstance, que les roues du wagon en expérience ayant glissé sur le même point de leur périmètre pendant des temps assez considérables, il avait dû en résulter, à ce point de contact, un méplat, s'agrandissant au fur et à mesure de la marche, s'échauffant et modifiant par suite les conditions du frottement.

Nous nous étions préoccupé de ce point de vue de la question dans le cours de nos expériences, d'après une indication donnée par M. J. Petiet dans son travail sur l'accident du 8 mai. M. J. Petiet annonçait que l'action des freins atteint son maximum lorsque les roues conservent encore un léger mouvement de rotation. Nous avons cherché à serrer les freins du wagon en expérience de manière à laisser à ses roues un mouvement de rotation appréciable, mais très inférieur à la vitesse de translation du système. Ces essais n'ont pas réussi; cependant il en est résulté des données utiles sur l'influence du renouvellement du point de contact pendant l'action des freins.

Dans l'expérience du 14 juillet, pour une vitesse de $12^{m}.25$ par seconde le tirage était de 736^{k}; les freins ayant été desserrés après un glissement sur 4 kilom., et resserrés immédiatement après, la vitesse se maintint à $12^{m}.5$ et la résistance du wagon à 758^{k}; le

renouvellement de la surface de contact n'avait pas eu d'influence sensible.

Dans l'expérience du 16 juillet, le wagon marchant à une vitesse assez régulière de 12m.70 par seconde, les freins furent alternativement serrés et desserrés à fond, quatre fois de suite, dans le parcours d'un kilomètre : la résistance varia de 0 à 2,000k, environ, en oscillant autour d'une valeur moyenne de 1000k. environ. Le même jour, à la même vitesse, après avoir glissé sur deux kilomètres, le wagon présentait une résistance de 940k,

L'aplatissement et l'échauffement du point de contact de la roue sur le rail seraient donc sans influence sensible sur la résistance définitive. C'est, du reste, ce que l'on pouvait conclure immédiatement des expériences, suivant l'observation très juste de M. Lechatellier. Ainsi, le 31 juillet, le wagon ayant déjà glissé sur près de 6 kilomètres, atteignit la vitesse de 20m par seconde et la conserva sur deux kilomètres. Pendant ce dernier parcours la résistance se maintint au chiffre constant de 464k, sans variations appréciables, malgré l'agrandissement certain du méplat et son échauffement.

Résultats d'expériences dynamométriques sur le tirage des trains,

PAR M. J. POIRÉE,
Ingénieur des ponts et chaussées.

Les expériences qui font l'objet de cette note ont eu pour but de constater l'effort de traction nécessaire pour remorquer sur niveau une machine mixte de la ligne de Lyon et son tender, chargés d'eau et de coke. Deux courses ont été faites le même jour : la première, de Paris à Melun; la deuxième, de Melun à Paris : la moyenne des deux résultats est considérée comme représentant le tirage sur niveau.

Ces expériences complètent les indications contenues dans un travail communiqué précédemment à la Société. (1er trimestre de 1852, pages 56 à 59.)

EXPÉRIENCE ENTRE PARIS ET MELUN.

Indication des points de la ligne.	Longueurs parcourues par le train		Longueurs sur lesquelles la vapeur n'a pas agi.	Tirage en kilogrammes	Travail en kilogrammètres		Temps de la marche pendant lequel				Vitesses en mètres par secondes.	CONDITIONS du profil longitudinal.
							la vapeur a agi		la vapeur n'a pas agi			
	partielles	totales			partiel.	total.	partiel.	total.	partiel.	total.		
											m	
2	220			638	140 360		22				10.00	Pente de 0m,005.
3	1000			615	615 000		98				11.76	Pente de 0,005 sur 480m.
4	1000			626	626 000		79				12.66	Rampe de 0,0016 sur 580.
5	1000			503	503 000		73				13.70	Rampe de 0,0016.
6	1000			369	369 000		69				14.70	Palier.
7	1000			347	347 000		73				13 70	Pente de 0,005.
8	1000			358	358 000		79				12.66	Palier.
9	1000			391	391 000		81				12.34	Id.
10	1000			425	425 000		80				12.50	Id.
11	1000			447	447 000		81				12.34	Id.
12	1000			481	481 000		77				12.99	Id.
13	1000			503	503 000		72				13.89	Id.
14	1000			526	526 000		69				14.49	Id.
	800			548	438 400		54				14.80	Id.
15	200			»	»						14.28	Id.
	30		230	»	»				14		15.00	Id.
	420			550	357 000				2			Id.
16	550			626	344 300		65				14.92	Id.
17	1000			576	576 000		68				15.38	Rampe de 1,004.
18	1000			550	550 000		71				14.08	Id.
19	1000			[illegible]	[illegible]		77				[illegible]	[illegible]

21	260		»	»				30		8.67	Id.
	200	460	»	»				36		5.53	Id.
	19,420				9 403 000		1427		82	arrêt	
	800		1074	859 200		126				6.67	Rampe de 0.004 à 0.008.
22	1060		847	847 000		78				12.82	Id.
23	500		783	391 500		69				14.49	Id.
	500		660	330 000							Id.
24	1000		671	671 000		69				14.49	Id.
25	1000		604	694 000		66				15.50	Id.
26	1000		671	671 000		68				14.70	Id.
27	600		638	382 800		69				14.49	Rampe de 0.004.
	400		358	143 200							Palier.
28	1000		358	358 000		71				14.08	Palier sur 470m.
29	1060		358	358 000		72				13.89	Pente de 0m.002 sur 530m.
30	1000		403	403 000		80				12.50	Pente de 0m.022 sur 260m.
31	1000		470	470 000		86				11.63	Palier sur 740m.
32	1000		492	493 200		78				12.82	Palier sur 520m.
33	1000		459	459 000		76				13.16	Rampe de 0.003 sur 480m.
34	1000		380	380 000		68				14.70	Rampe de 0.003 sur 860m.
35	1000		313	313 000		64				15.62	Palier sur 140m.
36	1000		280	280 000		64				15.62	Palier.
37	1000		302	202 000		65				15.38	Id.
38	1000		336	336 000		72				13.89	Pente de 0m.004 sur 330m.
39	1000		324	324 000		67				14.92	Palier sur 670m.
40	1000		291	291 000		63				15.87	Palier.
41	720		257	185 040		44				16.36	Pente de 0m.004 à 0m.008.
	280	280	»	»				17		16.47	Id.
42	1000	1000	»	»				81		12.34	Id.
43	330	330	»	»				63		5.24	Id.
	570	545	545	115 810		79				4.68	Pente de 0m.004.
44	300	300	»	»				62		4.84	Id,
	22,800				10 026 550		1586		293	arrêt	Id.
Totaux	42,220	2690			19 429 550		3013		305		

EXPERIENCE ENTRE MELUN ET PARIS (RETOUR).

Indication des points de la ligne.	Longueurs parcourues par le train : partielles	Longueurs parcourues par le train : totales	Longueurs sur lesquelles la vapeur n'a pas agi.	Tirage en kilogrammes	Travail en kilogrammètres : partiel.	Travail en kilogrammètres : total.	Temps de la marche pendant lequel la vapeur a agi : partiel.	Temps de la marche pendant lequel la vapeur a agi : total.	Temps de la marche pendant lequel la vapeur n'a pas agi : partiel.	Temps de la marche pendant lequel la vapeur n'a pas agi : total.	Vitesses en mètres par secondes.	CONDITIONS du profil longitudinal.
											m	
	50			626	31 300		43				1.16	Palier.
	50			1163	34 890		12				2.80	Id.
44	600			933	583 800							Rampe de 0m,004.
43	400			582	232 800		104				9.61	Id.
42	1000			526	526 000							Rampe de 0,004 à 0,005.
41	1000			638	638 000		92				10.87	Id.
40	1000			694	694 000		89				11.25	Id.
	850			828	703 800		85				11.76	Id.
39	150			671	100 650		75				13.34	Id.
38	1000			498	498 000		70				14.28	Palier.
37	1000			470	470 000		67				14.92	Palier sur 670m.
36	1000			503	503 000		74				13.51	Rampe de 0,004 sur 330m. Rampe de 0,004.
	700			548	383 600		78				12.82	Id.
35	300			828	248 400							Id.
34	1000			783	783 000		72				13.89	Id.
	380			806	281 780		91				16.66	Palier.
33	650		650	»	»				46		15.13	Id.
32	1000		1000	»	»				104		9.61	Id.
31	1000		1000	»	»				287		3.48	Palier sur 140m. Pente de 0,003 sur 860m.
	200		200	»	»				158		1.26	Pente de 0m,003.
		13 280				6 706 990		882"		595	arrêt	
	280			1309	366 520		50				5.60	Pente de 0m,003.
	520			749	389 480		44				11.82	Palier.
30	1000			660	660 000		69				14.49	Palier sur 740m. Rampe de 0,002 sur 260m.

29	1000			626	626 000		63			15.87	Rampe de 0.002 sur 530m.
28	1000			570	570 000		63			15.87	Palier sur 470m.
27	1000			391	391 000		63			15.87	Palier sur 400m.
26	1000			358	358 000		60			16.67	Pente de 0,004 sur 600m.
25	1000			347	347 000		59			16.95	Pente de 0,004 à 0,005.
24	1000			313	313 000		60			16.67	Id.
23	1000			291	291 000		59			16.95	Id.
22	1000			313	313 000		60			16.67	Id.
21	1100			358	358 000		59			16.95	Id.
20	1000			369	369 000		58			17.24	Pente de 0m,004.
19	1000			324	324 000		69			16.95	Id.
18	1000			313	313 000		92			16.13	Id.
17	1000			302	302 000		61			16.39	Id.
16	1000			391	391 000		65			15.38	Id.
15	000			716	716 000		63			15.87	Palier.
14	980			716	680 200		52			13.97	Id.
	50		50	»	»			3		16.67	Id.
13	1000		1000	»	»			75		13.70	Id.
12	1000		1000	»	»			132		7.57	Id.
11	250		250	»	»			106		2.51	Id.
		20 500				3 078 200		1729	376	arrêt	Id.
	750			1197	897 750		99			7.58	Id.
10	1000			805	805 000		63			15.87	Id.
9	1000			660	660 000		55			18.18	Id.
8	1000			459	459 000		56			17.86	Id.
7	1000			459	459 000		60			16.67	Id.
6	1000			470	470 000		68			14.70	Rampe de 0,003.
5	1400			459	459 000		75			13.51	Palier.
4	1000			425	425 000		75			13.51	Pente de 0,0016,
3	1000			391	391 000		76			13.16	Pente de 0,0016 sur 560m.
2	480			515	247 200		48			12.00	Rampe de 0,005 sur 420m.
											Rampe de 0,005 sur 160m.
1	520		520	»	»			53		9.81	Rampe de 0,001 sur 520m.
	540		540	»	»			110		4.91	Rampe de 0,001 sur 40m.
		10 290				5 272 950		667	163		Palier sur 480m.
	Totaux	43 680	6210			20 058 140		2678	1074		Palier.

RÉCAPITULATION DES DEUX EXPÉRIENCES.

INDICATION DES RÉSULTATS.	Expérience entre Paris et Melun.	Expérience entre Melun et Paris.	Totaux et moyennes.	OBSERVATIONS.
Longueur totale parcourue.	42 220m	43 620m	85 840m	
Temps de la marche en secondes.	3 320″	3 752″	7 072″	Déduction faite de tous les arrêts.
Id. id. en heures et fractions décimales de l'heure.	0h.92	1h.04	1h.96	
Vitesse moyenne de la marche en mètres par seconde.	12m.72	11m.62	12m.17	
Longueur sur laquelle la vapeur a agi.	39 620m	37 410m	77 030m	C'est-à-dire longueur pendant laquelle le régulateur de la machine du train a été ouvert.
Temps correspondant en secondes.	3 015″	2 678″	5 693″	
Id. id. en heures et fractions décimales de l'heure.	0h.84	0h.74	1h.58	
Vitesse moyenne correspondante en mètres par seconde. . .	13m.14	13m.97	13m.55	
Poids du train remorqué en tonnes.	46t	46t	46t	Comprenant la machine remorquée et 1 plate-forme pesant 3t.7.
Poids du train brut en tonnes.	86t	86t	86t	Comprenant la machine en feu, la machine remorquée et la plate-forme placée entre elles.
Travail total pour le remorquage du train seul.	19 429 550	20 058 140	39 487 690	Donné par le dynamomètre.
Résistance moyenne pour le train remorqué — sur la longueur parcourue pendant l'action de la vapeur — totale. . .			513k	
Résistance moyenne pour le train remorqué — sur la longueur parcourue pendant l'action de la vapeur — par tonne.			11k.15	
Résistance moyenne pour le train remorqué — sur la longueur totale parcourue — totale. . .			460k	
Résistance moyenne pour le train remorqué — sur la longueur totale parcourue — par tonne.			[illegible]	

Force en chevaux	pour le remorquage du train seul.	86 ch	100 ch	92 ch	Les forces en chevaux rapportées ci-contre sont calculées pendant le temps de l'action de la vapeur.
	pour le remorquage du train brut, abstraction faite des frottements additionnels de la machine du train.	160	187	172	
	pour le remorquage en tenant compte des frottements additionnels de la machine du train.	172	201	185	Les frottements additionnels ont été comptés approximativement pour les 0,15 du tirage.
Consommation en coke pendant l'action de la vapeur	totale	280k	240k	320k	
	par heure	333	324	329	
	par heure et par cheval du train remorqué.	3.87	3 24	3 58	
	Id. du train brut. . . .	2.08	1.73	1.94	
	par kilomètre	7.07	6.41	6.75	
	par tonne du train remorqué et par kilom.	0.153	0.139	0.146	
	Id. du train brut et par kilomètre. .	0.082	0.074	0.078	
Consommation en eau pendant l'action de la vapeur	totale.	2 460li	1 880li	4 340li	
	par heure	2928	2540	2744	
	par heure et par cheval du train remorqué.	34	25.4i	29.8	
	Id. du train brut. . . .	18.3	13.6	15.9	
	par kilomètre	62	50	56l	
	par tonne du train remorqué et par kilom.	1.35	1.09	1.22	
	Id. du train brut et par kilomètre. .	0.72	0.50	0 65	

RÉSISTANCE DE L'AIR.

L'air agit sur une plaque de $0^{mq}.25$, placée au dessus du tender de manière à dominer tout le train; les efforts exercés sur cette plaque sont donnés par un dynamomètre spécial.

Expérience entre Paris et Melun.

Travail total du vent sur la surface de l'anémomètre dont la section est de $0^{mq}.25$.	203078
Travail total sur une surface d'un mètre carré.	812312
L'anémomètre ayant fonctionné sur 41,220 mètres, la résistance moyenne de l'air par mètre carré a été de.	$19^{k}.70$
La force en chevaux correspondante au temps pendant lequel la vapeur a agi est approximativement pour un mètre quarré de	$3^{ch}.5$
Pendant l'expérience le vent naturel a fait avec la voie un angle moyen de.	70^{o}.
La résultante du vent naturel et de la vitesse du train a fait avec la voie un angle de.	$4^{o}.30$

Expérience entre Melun et Paris.

Travail total du vent sur la surface de l'anémomètre dont la section est de $0^{mq}.5$	230762
Travail total sur une surface d'un mètre carré.	923043
L'anémomètre ayant fonctionné sur 43090 mètres, la résistance moyenne de l'air par mètre carré a été de.	$21^{k}.42$
La force en chevaux correspondante au temps pendant lequel la vapeur a agi est approximativement pour un mètre quarré de.	$4^{ch}.6$

Pendant l'expérience, le vent naturel a fait avec la voie un angle moyen de. . . . . 113°

La résultante du vent naturel et de la vitesse du train a fait avec la voie un angle de. . . . . 6°

Il résulte de ces indications que le vent naturel n'avait aucune importance; l'atmosphère était à peu près calme.

Observations et conclusion.

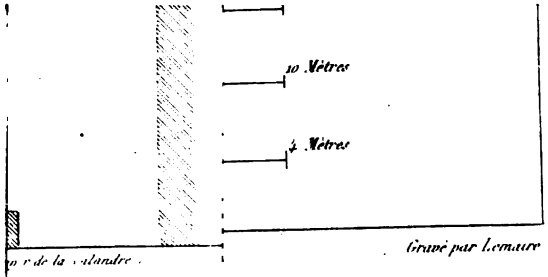
Pendant l'expérience, les cylindres de la machine remorquée ont été huilés avec le plus grand soin; la marche était en avant, les purgeurs fermés : aucune pièce n'a chauffé. Cette machine sortait de service; son feu a été jeté au commencement de l'expérience. Ce qui prouve, du reste, qu'elle a été pendant l'essai dans des conditions à peu près normales, c'est que, le régulateur de la machine qui opérait la traction ayant été fermé au kilomètre 13, les deux machines sont arrivées jusqu'à l'arrêt sans qu'il se soit manifesté entre elles de traction sensible, sauf un ou deux à-coups un peu avant l'arrêt; le même fait avait été produit entre les kilomètres 34 et 31.

On avait placé une plate-forme entre le dynamomètre et la machine remorquée, afin de conserver autant que possible la résistance de l'air sur cette dernière. Mais cette précaution était certainement insuffisante; de sorte que le travail obtenu, un peu fort relativement aux résistances dans les cylindres, est au contraire faible relativement à la résistance de l'air. Nous pensons que l'on peut établir une compensation entre ces deux éléments.

D'autres expériences ont, en effet, indiqué que, dans les conditions des marches précédentes (soit 13^{m} environ de vitesse par seconde, la distribution en avant, les purgeurs fermés, le régulateur ouvert), il se produisait dans la chaudière de la machine remorquée à froid un vide permanent mesuré par une hauteur de mercure variant de 11 à 15 centimètres, suivant l'état des organes de la ma-

chine. Lorsque le régulateur était fermé, le vide se maintenait au même degré dans le conduit de vapeur. L'ouverture ou la fermeture des purgeurs avait peu d'influence sur la valeur absolue du vide, soit environ 0m.03 de hauteur de mercure. Il est facile de se rendre compte que l'on peut sans erreur notable compenser la résistance résultant de ce vide avec l'augmentation de la résistance que l'air exercerait sur la machine si elle n'était pas entièrement masquée par celle qui la remorque.

En résumé, il nous paraît résulter des faits qui viennent d'être exposés que le tirage des machines mixtes de la ligne de Lyon, marchant de 45 à 50 kilomètres à l'heure, peut être fixé à 11 kil. par tonne.


10 Mètres
5 Mètres
Gravé par Lemaire

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

(Juillet, Août et Septembre 1852)

N° 18

Pendant ce trimestre on a traité les questions suivantes :

1° Suite de la discussion sur la construction des ponts en tôle et en fonte (Voir le résumé des séances, page 147);

2° Chute du pont en pierre à Angers (Voir le résumé des séances, page 151);

3° Communication de M. Love relative à la création d'une nouvelle classe de membres (Voir le résumé des séances, page 153);

4° Amélioration introduite dans les cabestans des navires (Voir le résumé des séances, page 155);

5° Emploi de la détente variable dans les machines locomotives de M. J.-J. Meyer (Voir le résumé des séances, page 155);

6° Explications de M. Jullien relatives à la trempe et aux carbures de fer (Voir le résumé des séances, pages 156 à 165 et 175 à 177);

7° Traitement des blendes par le bois (Voir le résumé des séances, p. 165);

8° Produits réfractaires (Voir le résumé des séances, page 166);

9° Extrait de deux mémoires lus à l'Institut des ingénieurs civils

de Londres relatifs à l'exploitation des chemins de fer (V. le résumé des séances, p 169 à 175) ;

10° Résistance à la traction des wagons à freins et résistance des trains à la traction (Voir le résumé des séances, pages 181 à 188) ;

11° Monte-charge hydraulique construit au chemin de fer de l'ouest. (V. le résumé des séances, page 188).

Pendant ce trimestre la Société a reçu :

1° De M. C.-E. Jullien, ingénieur des forges de Montataire, une note sur la démonstration pratique que tous les carbures de fer sont des dissolutions.

2° Du même, un mémoire sur la cémentation de la fonte dans les oxydes métalliques.

3° De M. Petitgand, un mémoire sur les produits réfractaires.

4° De M. Jules Poirié, ingénieur des ponts et chaussées, 1° une note sur les expériences relatives à la traction et à la consommation des machines locomotives faites au chemin de fer de Lyon ; 2° une note sur des expériences faites sur les résistances à la traction des wagons à freins ; 3° une note sur des expériences faites sur les résistances des trains à la traction.

5° De M. Meyer, une note sur l'emploi de sa détente variable dans les machines locomotives.

6° De M. Molinos, une note sur le monte-charge construit au chemin de fer de l'ouest par M. Eug. Flachat.

7° De M. Guillaume, un mémoire sur l'exploitation des ardoisières d'Angers.

8° De M. Lemoine, une note sur les plateaux coussinets en fonte.

9° De M. Goschler, une note sur la fabrication du coke dans les bassins houillers de la Ruhr et Saarbruck.

10° De M. Mathias (Ferdinand), une note sur les procédés de conservation des bois.

11° De la Société industrielle de Mulhouse, un exemplaire de leur Bulletin.

12° De M. Le Chatelier, ingénieur en chef des mines, un exem-

plaire de la deuxième partie de son ouvrage sur les chemins de fer d'Angleterre en 1851.

13° De M. Hensinger de Waldegg, ingénieur du matériel au chemin de fer du Taunus, de Wisbade à Francfort, un exemplaire de ses publications sur le matériel des rails-ways.

14° De M. Salvetat, un exemplaire de ses recherches sur la composition des matières employées dans la fabrication et la décoration de la porcelaine en Chine.

15° De M. Phillips, ingénieur des mines, un exemplaire de son mémoire sur les ressorts.

16° De M. Ch. Deville, un exemplaire de sa thèse de licence en droit.

17° De M. Girard, 1° un exemplaire d'une note sur les expériences constatant l'augmentation de rendement due à l'hydropneumatisation des turbines; 2° un exemplaire d'une note sur les chemins de fer hydrauliques.

Ont été reçus membres de la Société :

Au mois de juillet,

MM. Hamoir, présenté par MM. Eug. Flachat, J. Petiet et Vuigner.

Laurent, présenté par MM. Eug. Flachat, J. Petiet et Nozo.

Note sur le raccourcissement du souterrain de l'Europe au chemin de fer de Saint-Germain,

PAR M. H. MATHIEU,

Ingénieur, chargé de la direction des études au chemin de fer de Saint-Germain.

Les travaux pour l'établissement, à Paris, de la gare du chemin de fer de l'Ouest, sur la rive droite de la Seine, à côté de celle de Saint-Germain, ont conduit M. E. Flachat, ingénieur de la compagnie, pour satisfaire à des considérations d'art et pour améliorer les conditions du service d'exploitation et de traction, à diminuer la longueur du souterrain, dit souterrain de la place de l'Europe, du côté qui fait face au bâtiment des salles d'attente.

Tout le monde connaît l'activité qui règne dans cette gare, tête de trois lignes principales : Versailles, Saint-Germain, Rouen et le Havre.

Ce souterrain, distant de la façade du bâtiment de 200 mètres seulement, est constamment parcouru, non seulement par les machines qui conduisent les trains réguliers, mais encore par celles qui font leurs mouvements de gare; il n'y a donc presque pas d'instant où il n'y ait une machine en passage sous cette voûte. Du côté qu'il s'agissait de démolir, il y avait quatre voies de front qui ne laissaient sur les côtés que le jeu nécessaire au passage des wagons; de plus, sa forme cylindrique, en supprimant les pieds droits verticaux, ajoutait une nouvelle difficulté, par la crainte où l'on était que les pierres ne tombassent sur la voie pendant la démolition.

Il fallait donc démolir une partie de ce souterrain sur une longueur de 22 mètres, sans interrompre le service, sans gêner en rien le passage des machines; puis, ce travail de démolition exécuté, construire une nouvelle tête en pierre de taille et la raccorder avec la partie restante du souterrain.

La première opération a été de dégarnir de terres le sommet de la voûte, et de mettre à nu la maçonnerie d'extrados jusqu'au niveau du point où l'on devait établir un plancher de service, c'est-à-dire

jusqu'à l'entrait des fermes. Cette opération n'a présenté aucune difficulté.

La seconde opération a été l'installation de l'appareil en charpente qui devait servir à la démolition de la voûte.

Cet appareil, très simple, destiné à garantir la voie de la chute des pierres, se composait de fermes avec entraits, arbalétriers, vaux et couchis, reliés ensemble par des moises. Chaque ferme était surmontée d'un cadre également en charpente qui embrassait la voûte extérieurement, et servait à soutenir le milieu de l'entrait et un petit chariot de service.

La figure 1 de la planche 25 donne l'idée complète des quatre fermes semblables espacées de 2 mètres. La difficulté était d'appuyer ces espèces de fermes et de les mettre en place.

L'appui s'est trouvé tout naturellement sur les pieds droits de la voûte; à cet effet, l'on a percé dans la maçonnerie des trous de 0m.50 de côté, à l'endroit où les entraits devaient la traverser.

Sur le cintre de la voûte, ces trous se trouvaient correspondre à un angle de 32°. On sait que l'angle de 30° est celui au dessus duquel les voussoirs commencent à glisser les uns sur les autres; mais ici, les maçonneries étant très anciennes, on n'avait pas à redouter cet inconvénient, et, à l'exception de la tête, la maçonnerie était en moellon.

En outre des trous latéraux percés pour le passage de l'entrait, l'on avait percé la voûte à son sommet pour le passage de forts boulons de 30 millim. de diamètre, qui devaient faire reporter la charge du poinçon sur la charpente extérieure, laquelle embrassait la voûte en venant reposer sur les extrémités des entraits, et dont la partie supérieure, formée d'un madrier horizontal, recevait un rail qui formait une partie de la voie sur laquelle roulait un wagon de service portant un treuil. Ce treuil a servi à l'enlèvement et au transport des voussoirs d'une extrémité à l'autre de la voûte.

Les quatre fermes, placées l'une à côté de l'autre, ont permis de démolir à la fois 6 mètres de longueur de voûte.

Les fermes et les couchis étant placés et calés sous la voûte, on a commencé la démolition par une séparation complète de cette longueur d'avec le reste de la maçonnerie.

On a d'abord enlevé la tête, qui était composée de voussoirs en pierre de taille de $0^m.90$ de hauteur sur $0^m.40$ de largeur et $0^m.80$ d'épaisseur.

On a procédé à l'enlèvement de la clé; on l'a d'abord dégarnie des moellons qui l'entouraient dans toute sa hauteur, et on l'a sciée d'un côté seulement à l'endroit d'un joint. Ce trait de scie a été suffisant pour décoller l'autre joint, ce qui a été fait au moyen d'un cric.

Lorsqu'on a été assuré que la clé ne tenait plus à la maçonnerie, on l'a louvée, et, à l'aide du treuil porté sur chariot mobile placé à la partie supérieure, on l'a enlevée complétement.

La clé enlevée, tous les autres voussoirs ont suivi : on n'a pas eu besoin de les scier au joint; on les décollait à l'aide du cric, puis on les enlevait comme la clé au moyen de la louve.

La liaison des parties était telle, qu'elles formaient masse, et que, la clé enlevée, la maçonnerie ne s'est pas affaissée.

Une fois la demolition de la tête commencée, on a entamé celle du moellon, et on l'a continuée symétriquement à partir de la tête, par anneau en suivant les génératrices de la voûte. On a ainsi démoli jusqu'à l'appui des entraits, c'est-à-dire jusqu'à $3^m.46$ du sommet de l'intrados, et à $4^m.72$ à partir du niveau du rail, en sorte que, dans ce point, l'inclinaison des voussoirs abandonnés à eux-mêmes (puisque les couchis ne les soutenaient plus) répondait, comme nous l'avons dit plus haut, à un angle de 32°; ils surplombaient la base de $1^m.25$.

On pouvait craindre que les moellons ainsi abandonnés ne tombassent sur la voie et ne gênassent le passage des trains; mais il a été possible de les retirer à peu près tous en arrière sans inconvénient, et sans prendre d'autres précautions que de les enlever quand ils tombaient sur la voie.

La verticale menée de l'arête d'appui de l'entrait tombait sur l'axe du rail extérieur, c'est-à-dire à 1m.25 du pied droit.

Si ces moellons ne s'étaient pas tenus d'eux-mêmes, il aurait fallu, par des espèces de boucliers en tôle, continuer la surface des couchis. Des études avaient été faites pour ce cas, mais elle n'ont servi que pour la reconstruction.

La longueur totale de la partie à démolir était de 22 mètres; l'espace occupé par les quatre fermes en charpente était de 6 mètres: en sorte que la démolition s'est faite en changeant les fermes quatre fois de place.

On démolissait la partie formant les pieds droits de la voûte à mesure qu'on déplaçait les fermes. Cependant on a réservé jusque après la reconstruction de la tête et sur 5 mètres de longueur la portion des pieds droits qui soutenait les deux fermes placées en dehors de la nouvelle tête. On a ainsi évité un échafaudage spécial pour les soutenir.

Entre ces pieds droits et la voûte où s'arrêtait la démolition, on a enlevé les moellons jusqu'à la fondation; on a fait pour ainsi dire une tranchée annulaire de 2 mètres de largeur, tranchée dans laquelle on devait élever la nouvelle tête en pierre de taille, et la raccorder au moyen de moellons avec la maçonnerie conservée.

L'échafaudage pour la reconstruction a donc été le même que pour la démolition; on n'y a fait qu'une addition, qui a eu pour but de descendre le cintre plus bas que ne le permettaient les fermes, afin d'y appuyer la maçonnerie et refaire la voûte en toute sécurité.

Cette addition a consisté dans l'emploi de deux grandes cerces en fer à double T qu'on a scellées solidement en terre à 1 mètre de profondeur, et qu'on a fait reposer sur les entraits des fermes supérieures.

Ces cerces étaient placées de chaque côté de la tranchée dont nous avons parlé; elles étaient en outre éloignées d'environ 10 millim. de l'intrados, afin de pouvoir passer des couchis à partir de 1m.60 du sol, couchis qui ont été rejoindre ceux placés sur les fermes.

Dans la crainte que, vers la partie supérieure, les couchis qui devaient supporter la tête en pierre de taille ne cédassent sous la charge, on a mis pour les soutenir, et entre les deux fermes en bois, un cintre en fer de même forme que les cerces, et qui venait s'appuyer sur les deux moises horizontales inférieures de ces fermes.

On a eu ainsi un cintre parfaitement solide, qui a permis d'achever ce travail sans le moindre accident, sans la moindre difficulté.

Les pierres de taille et les moellons employés pour refaire la tête (qui est restée droite) ont été ceux qu'on avait retirés; on a seulement retaillé les voussoirs; on les a en quelque sorte remis à neuf, ce qui a pu être fait sans difficulté.

C'est ainsi que s'est accompli en peu de temps et à peu de frais un travail qui, au premier abord, semblait devoir être plein de difficultés, à cause de l'extrême activité de la gare, dont il ne fallait pas interrompre un instant le service.

C'est un de ces travaux ingrats qui ne laissent aucune trace des obstacles qu'on a eus à vaincre et des moyens qui ont servi à les mener à bonne fin; c'est ce qui nous a engagé à en donner communication, en y joignant les dessins qui peuvent rappeler toutes les époques du travail.

MÉMOIRE N° XXXI.

Sur la reconstruction du pont biais de Clichy, chemin de fer de Saint-Germain,

PAR MM. H. MATHIEU ET LAVALLEY.

PREMIÈRE PARTIE.

Le pont de Clichy est situé sur le chemin de fer de Paris à Saint-Germain, près d'Asnières; il donne passage au chemin de fer sur la route qui conduit de Paris à Argenteuil. Ce pont, originairement construit en bois, avec cintres en arcs de cercle, est un pont très biais. L'angle sous lequel le chemin de fer et la route se coupent en cet endroit est de 25°. La largeur du passage perpendiculaire aux maçonneries est de 8^m, et celle dans le sens des têtes est de 22^m. Avant sa reconstruction, sa longueur était de $23^m,66$; il portait trois voies de fer de $1^m.44$ d'écartement intérieur avec des entre-voies de $1^m.60$.

Ce premier pont en bois, construit en 1834 pour le chemin de Saint-Germain seulement, a successivement augmenté d'importance par l'exploitation des chemins de Versailles, rive droite, de Rouen et du Havre. Le passage fréquent des trains que l'extrême activité des trois lignes qu'il dessert l'ont plus fatigué que ceux du même système construits plus loin; aussi l'on a été obligé de consolider d'abord, au moyen de corbeaux et de jambes de force s'appuyant sur les culées, les fermes, qui commençaient à fléchir; ensuite on l'a débarrassé de son ballast en portant la voie sur longrines; enfin il y a deux ans on l'a soutenu en son milieu et dans toute sa longueur parallèlement aux culées par une palée en bois qu'on a disposée de façon à servir au montage et à la substitution facile d'un nouveau pont, soit

en fonte, soit en tôle, et dont les projets étaient déjà terminés quand on l'a établie.

Cette palée, parallèle aux murs de culée et posée sur la route, soutenait chaque ferme à son sommet, et divisait ainsi en deux espaces égaux les points d'appui des fermes.

Les deux projets en fonte et en tôle furent mis en présence; ils ne furent d'abord étudiés que pour l'établissement de trois voies.

Dans ces conditions, le pont en fonte présentait une certaine économie sur le pont en tôle. Les maçonneries pouvaient rester ce qu'elles étaient; le passage des arcs en fonte pouvait se faire facilement et se placer à côté de ceux en bois, et le prix des poutres et accessoires en fonte était inférieur à celui du système en fer.

Le système en tôle, composé de poutres droites, exigeait pour s'appuyer le remaniment et la consolidation des maçonneries dans les points d'appui; en outre son prix de revient était plus élevé.

Enfin on avait fait pour la reconstruction de ce pont une étude comparative de quelques systèmes employés, et voici les chiffres auxquels on était arrivé :

Charpente en bois en arc de cercle. . . .	34,000 fr.
Fonte en arc de cercle	47,000
Tôles avec une portée avec poutres droites. .	50,000

Comme on voit, l'avantage restait à la fonte sur le fer.

Mais la nécessité d'établir une quatrième voie sur le chemin de fer entre Paris et Asnières a conduit à une autre étude, et la disposition biaise du pont a permis de profiter de l'appui naturel des culées, dont la distance est, comme nous l'avons dit, de 8^{m}, pour y faire reposer la plus grande et la plus importante partie des pièces de pont (ces pièces sont désignées par la lettre A dans le plan d'ensemble, fig. 4, pl. 25), et de construire ensuite deux grandes poutres qui, placées à chaque tête des culées, supporteraient une des extrémités des autres pièces de pont (B, C, D, E, F, G, H, I, K, L), qui n'avaient qu'un appui sur la maçonnerie. C'est ce qu'on avait déjà fait dans l'étude du pont pour trois voies avec poutres en tôle et

palées en fonte. Cette disposition a permis d'avoir pour longueur, section et poids des pièces de pont, le minimum possible, tandis que, si on les avait placées parallèlement à la voie de fer, leur longueur, au lieu de correspondre à une portée de 8m, eut correspondu à une portée de 20m, et ce nombre de pièces de pont, ayant dû être égal à celui des voies, on serait arrivé à un poids considérable.

Dans le premier système, le nombre des pièces de pont augmente avec celui des voies; mais, comme nous l'avons dit, ces pièces n'ont que 8m de portée au lieu de 20, et quant aux poutres de têtes P, quel que soit le nombre des voies, il ne peut y en avoir que deux.

On voit donc enfin qu'avec la disposition adoptée pour le pont en question, le cas le plus défavorable est celui où l'on veut l'appliquer à l'établissement d'un pont à une seule voie, et qu'elle devient de plus en plus économique à mesure que le nombre des voies augmente.

Description de l'ensemble.

Le principe de la construction du pont ainsi établi, on a calculé les différentes parties suivant la charge que chacune avait à porter. Disons un mot de l'ensemble tel qu'il existe aujourd'hui.

Le pont se compose d'une série de pièces de pont A, toutes de même longueur, reposant des deux côtés sur les culées, et ayant à peu près les mêmes efforts à supporter, et d'une série de pièces de pont B, C, D, E, F, G, H, I, K, L, de longueur variable, s'appuyant d'un côté sur les culées, et de l'autre sur les poutres de tête P.

A l'endroit des culées, toutes les pièces de pont sont rivées sur une espèce de poutre en tôle en forme de double T qu'on a appelée longeron. Ces deux longerons et les deux poutres de tête forment un parallélogramme rigide entre les côtés duquel sont renfermées les pièces de pont.

Toutes les pièces de pont sont placées à la même hauteur et sont de niveau; elles reçoivent un plancher jointif en bois de chêne de

0,10 d'épaisseur. Sur ce plancher reposent les longrines qui supportent les rails. Elles sont fixées au moyen de boulons.

Les madriers qui forment le plancher sont placés perpendiculairement aux pièces de pont, et les longrines sont disposées dans le sens de la voie, c'est-à-dire obliques à ceux-ci, de manière à répartir sur une plus grande surface la charge qui se trouve placée sur une voie.

Cette disposition, qui tend à intéresser la surface entière du pont au passage des trains, donne une plus grande sécurité, en faisant travailler la tôle à un poids plus faible que celui pour lequel ses dimensions ont été calculées.

Description détaillée des pièces de pont.

Toutes les pièces de pont ont la forme d'un double T; la paroi verticale est faite d'une feuille de tôle de 6^{mm} d'épaisseur; les parties horizontales sont faites avec des cornières rivées sur la paroi verticale et recouvertes d'une bande de tôle large de 186^{mm} à 220^{mm} sur une épaisseur allant de 6^{mm} à 13^{mm}.

Les seules pièces de pont F, G,H, I, K, L, qui ont peu de charge à porter, ont leur partie horizontale faite simplement avec des fers de cornière, sans plate-bande de recouvrement.

Pièces A. — Toutes les pièces de pont A ont les mêmes dimensions et la même longueur. Cette longueur est de $8^{m}68$; l'épaisseur de la paroi verticale est de 6^{mm}; la largeur des cornières est de $90/90^{mm}$ avec 14^{mm} d'épaisseur, et la bande horizontale supérieure et inférieure, faite en fer laminé, est de $13^{mm}\,1/2$ d'épaisseur sur 220^{mm} de largeur.

Dans ces pièces de pont, les rivets ont un diamètre de 18^{mm}; ils sont espacés de 150^{mm}. Toutes les rivures ont été faites à la main; les trous percés dans les tôles l'ont été au poinçon, et ceux percés dans les cornières l'ont été à la machine à forer; les deux têtes de

rivets sont rondes, en forme de calotte sphérique, dont la hauteur varie de 12 à 15^{mm}.

Les pièces A reposent sur les culées; elles sont rivées aux longerons au moyen de deux fers cornières qui embrassent la paroi verticale dans toute sa hauteur.

L'extrémité de chaque pièce A porte en outre sur la partie horizontale du longeron qui repose sur la maçonnerie, de sorte que les rivets ne tendent pas à être coupés.

Les tôles verticales ainsi que les cornières sont d'une seule longueur.

Les cornières d'assemblage des pièces A avec les longerons ont 65/65^{mm} et 10^{mm} d'épaisseur; les rivets ont 16^{mm} de diamètre. Les pièces A sont au nombre de 9.

Entretoises. — Pour consolider ces pièces, les rendre solidaires et les empêcher de se voiler, on les a reliées par une série d'entretoises faites de tôles verticales réunies aux pièces A au moyen de cornières et de rivets.

Ces cornières ont 65/65^{mm}. Les rivets ont 20^{mm} de diamètre et sont espacés de 90^{mm}.

Pièces B, C, D, *etc.* — Les pièces B sont semblables aux pièces A quant à la section transversale; elles ont une longueur de 8^{m}.50; elles reposent d'une part sur les culées, de l'autre sur les poutres de tête P; leur assemblage avec le longeron est comme celui des pièces A; leur attache sur la poutre de tête se fait au moyen de cornières et de rivets.

On voit que la section des pièces C, D, E, F, G, H, diminue avec leur longueur.

Les pièces de pont qui portent d'une part sur les culées, et de l'autre sur les poutres de tête, ont leur assemblage sur le longeron en tout semblable à celui des pièces de pont précédentes; mais, comme leur hauteur va en diminuant pour les faire reposer sur les maçonneries, et éviter par conséquent que les efforts n'agissent sur les rivets, on rachète la différence de hauteur par des espèces de sabots

en fonte également en forme de double T, rivés sur la partie inférieure de ces pièces et posant directement sur la maçonnerie.

Leur assemblage avec la poutre de tête a lieu par l'intermédiaire de cornières. Pour donner plus de rigidité en ces points à la paroi verticale de la poutre, et plus de force aux rivets, qui portent toute la charge, on a descendu toutes ces cornières jusqu'à la tôle horizontale inférieure.

Les pièces C, D, E, sont composées, comme les pièces A, B, d'une tôle ou paroi verticale de 6^{mm} d'épaisseur, de cornières de $90/90^{mm}$ sur 14^{mm} d'épaisseur, et d'une tôle de recouvrement de 11^{mm} pour la pièce C, 8^{mm} pour la pièce D, et 6^{mm} pour la pièce E, sur 200 et 180^{mm} de largeur.

Les rivets sont espacés de 100^{mm}; leur diamètre est de 18^{mm}.

Les pièces de pont F, G, H, I, K, L, conservent la même forme de double T, mais elles n'ont pas de tôle de recouvrement supérieur et inférieur. Comme elles n'ont qu'une faible charge à supporter, la section des cornières suffit à leur donner la résistance voulue.

Les épaisseurs de ces cornières varient d'une pièce à l'autre, ainsi que leur hauteur et leur longueur.

Longerons. — Les longerons ont la même forme que les pièces de pont, avec cette différence cependant que la tôle verticale de la partie supérieure présente une saillie de $0^{m}.1$ pour encadrer le plancher en bois qui couvre le pont.

Cette tôle a $0^{m}.006$ d'épaisseur et $0^{m}.726$ de hauteur; les cornières ont $65/65^{mm}$ sur 10^{mm} d'épaisseur; les rivets ont un diamètre de 18^{mm} et sont espacés de 100^{mm}.

Poutres de tête. — Les deux poutres de tête sont identiques.

Le système de ces poutres est celui imaginé par Brunel (fig. 5 et 6).

Ce système est très bon; la forme de secteur adoptée pour la section transversale de la partie supérieure convient parfaitement au genre d'efforts qu'elle supporte, et sous une forme légère elle permet d'y accumuler beaucoup de matière.

La partie inférieure, qui doit résister à la traction, est faite d'une

seule épaisseur de tôle, variant de 8 à 15^{mm}, légèrement arquée dans le sens transversal pour faciliter l'écoulement de l'eau. Les épaisseurs des tôles dans les parties horizontales inférieures vont en diminuant du milieu aux extrémités ; l'inverse a lieu pour la paroi verticale.

Par suite de la disposition des pièces de pont et de leur appui sur la poutre de tête, la résultante des forces ne tombe pas au milieu de cette poutre, mais à 7^{m}.50 du point d'appui le plus chargé, et à 13^{m}.50 de l'autre. C'est aussi à ce point que se trouvent les épaisseurs de tôle horizontale les plus fortes, et c'est à partir de ce point qu'elles vont en diminuant jusqu'aux extrémités.

On a donné à cette poutre dans sa longueur une forme arquée avec une flèche de 0^{m}.10.

Dilatation. — Bien que les effets de la dilatation et de la contraction ne doivent pas être considérables dans ce système, on les a cependant ménagés en faisant glisser sur des rouleaux les extrémités angulaires du pont les moins chargées, c'est-à-dire celles qui se rencontrent sous l'angle aigu.

On a scellé dans la maçonnerie des plaques de fonte sur lesquelles chaque extrémité est posée ou encastrée.

Montage. — La substitution du pont en tôle au pont en bois a été faite sans rien modifier à la voie ni au service des trains, et cependant il passe régulièrement en ce point sur les trois voies cinq trains toutes les heures.

Cette substitution du pont en tôle a été facilitée :

1° Par la palée en bois dont nous avons parlé plus haut ;

2° Par le déplacement des longrines de la voie à côté des fermes du pont, déplacement fait antérieurement à cette reconstruction ;

3° Par l'allongement des maçonneries, qui ont permis de placer tout d'abord les poutres de tête, et de s'en servir comme de point d'appui ;

4° Par la condition où l'on s'est trouvé de pouvoir baisser de 0^{m}.48 le niveau des rails ; par conséquent, de baisser d'autant le tablier du pont définitif.

Il nous serait difficile d'entrer dans tous les détails de ce travail ; il nous suffira, je pense, d'en indiquer le principe. Il faut se rappeler que le pont à remplacer était très biais, et que les fermes étaient des arcs de cercle : cette disposition devait nécessairement augmenter les difficultés.

Le principe de la substitution a été de faire un pont en bois avec une série de poutres droites placées perpendiculairement aux culées, et reposant d'un côté sur ces mêmes culées, de l'autre sur la palée, et disposées de façon à supporter les longrines des voies en service, à décharger les fermes en bois et les enlever, et enfin assez écartées l'une de l'autre pour passer entre deux les poutres en tôle du pont définitif.

En outre, pour consolider les longrines de la voie, on les a étayées par des poteaux qui venaient prendre leur point d'appui sur le trottoir de la route : car il faut encore ajouter que les difficultés étaient augmentées par la circulation très active des voitures qui passent sous ce pont, circulation qu'on ne pouvait pas interrompre. La palée qui divisait le passage en deux a permis naturellement de barrer le chemin, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, suivant les besoins du travail, comme elle a permis de diviser en deux la longueur des poutres en bois qui devaient former le pont provisoire.

On n'a pas fait entièrement ce pont provisoire avec madriers droits, c'eût été trop coûteux ; on s'est contenté de les placer dans les endroits indispensables au fur et à mesure de l'avancement des travaux, pour soutenir les longrines de la voie et passer successivement chaque poutre en tôle. Toute poutre en tôle mise en place servait dès lors d'appui aux longrines de l'ancienne voie, et on enlevait les madriers pour les porter plus loin.

Comme on voit, il fallait agir avec une prudence extrême : toute pièce de bois de l'ancien pont supportant la voie, avant d'être coupée ou enlevée, était préalablement remplacée par une autre pièce, poteau ou traverse, suivant les cas où l'on se trouvait.

Les arcs du pont, comme les autres pièces secondaires, ont été

également coupés par moitié ou par partie, suivant l'avancement du travail.

Le levage des poutres de tête n'a pas été non plus sans difficultés, parce qu'il ne fallait pas barrer entièrement le passage des voitures.

On les a montées l'une après l'autre et de jour, en les plaçant sur la chaussée dans le prolongement des culées et en dehors du pont; on les a élevées ainsi verticalement au moyen de quatre chèvres jusqu'au dessus de la palée, qui avait été allongée dans ce but; à cette hauteur on les a fait porter sur deux chevalets en bois, et en déplaçant les chèvres on leur a fait décrire un arc de cercle pour assurer une des extrémités sur les culées et leur milieu sur la palée.

En déplaçant encore une fois les chèvres et les amenant sur le trottoir, de manière à ne pas obstruer le passage des voitures, on a conduit la deuxième extrémité sur l'autre culée.

La pose des longerons a été facilitée par la grande distance naturelle entre l'arrasement des maçonneries nouvelles et le dessous des longrines de la voie; cette distance tenait surtout à ce qu'on baissait le nouveau pont de $0^{m}.48$: car, si les deux tabliers avaient dû être de niveau, les difficultés auraient été de beaucoup augmentées.

Voici les bases sur lesquelles on s'est appuyé pour le calcul du pont. Les poutres de tête ont été considérées comme pièces posées et chargées de poids inégalement répartis, ces poids provenant des réactions qu'elles éprouvent des pièces de pont B, C, D, E, etc.

Toutes ces réactions donnent une série de forces variables, dont la résultante est appliquée à $7^{m}.50$ environ du point d'appui de la pièce de pont B du côté de la partie fixe. Cette résultante étant déterminée, on calcule les épaisseurs des poutres supérieure et inférieure en prenant le moment d'inertie de la pièce et l'égalant au moment de la charge.

La forme particulière de la pièce nécessite la recherche de ce moment d'inertie.

Les pièces de pont ont été calculées comme pièces posées à leur extrémité et uniformément chargées. L'uniformité de la répartition

de la charge tient surtout à la disposition du plancher, qui rend tout le système solidaire.

La formule employée pour ce cas, la forme du solide étant celle d'un fer à double T, a été

$$\frac{pl^2}{4} = \frac{RI}{v'} = \left(\frac{ab^3 - a'b'^3}{6b}\right)R,$$

p poids par mètre courant,

l longueur de la pièce,

a largeur de la poutre,

a' différence entre la largeur et l'épaisseur de la paroi verticale,

b hauteur totale extérieure de la poutre;

b' hauteur totale intérieure,

R résistance du fer par mètre quarré de section.

Poids. Le poids total de la partie en fer et tôle montait à 50,960[k] distribués de la manière suivante :

2	poutres en tôle	19,000[k]
9	pièces A	12,600
2	» B	2,500
2	» C	2,100
2	» D	1,800
2	» E	1,450
2	» F	1,320
2	» G	1,220
2	» H	860
2	» I	580
2	» K	360
2	» L	270
	Longerons	5,500
	Entretoises	1,400
		50,960[k]

Le prix à forfait était de 36,000 fr., montage non compris, ce qui fait revenir le kilogramme à 70 centimes.

Epreuves. Il reste à parler des épreuves auxquelles ce pont a été soumis.

Le mode d'épreuve a consisté à faire stationner et passer en vitesse sur chaque voie des trains composés de deux machines locomotives des plus lourdes que la Compagnie possède. Les flexions n'ont pas excédé 6^{mm}. On a remarqué que la différence de flexion entre la charge en stationnement et celle en vitesse ne différait pas sensiblement; mais que, dans ce dernier cas, il y a des vibrations qui ne se manifestent pas dans le premier, ceci est facile à concevoir. En second lieu, pendant le passage des trains réguliers composés d'une machine et de 10 wagons, les flexions sous la machine ont été le double de celles observées sous les wagons.

Les flexions des poutres de tête ont été plus faibles que celles des pièces de pont, et quant aux longerons, on n'a pas remarqué le moindre déversement sur leur hauteur.

Quoique le pont ait été construit pour quatre voies, ce n'est que sur les trois qui sont les seules posées que les épreuves ont été faites.

Nous joignons à ce mémoire le procès-verbal des épreuves qui ont été faites.

Epreuves du pont de Clichy.

Le nouveau pont en tôle construit sur la route d'Asnières à Argenteuil, dit pont biais de Clichy, ayant été complétement terminé le 23 février, on a procédé le lendemain 24, à deux heures de l'après-midi, aux épreuves qu'il devait subir, conformément au cahier des charges, pour être accepté par la Compagnie.

Ces épreuves, prescrites par M. E. Flachat, ingénieur de la compagnie, ont eu pour but de constater les flexions des poutres de tête et des pièces de pont en leur milieu, à l'endroit des rails, pendant le stationnement et le passage des machines.

Les épreuves ont eu lieu à la fois sur les trois voies qui existent sur le pont, et qui sont désignées par :

1° A, voie de retour de Saint-Germain;

2° C, voie de départ (ou de milieu);

3° B, voie de retour de Versailles.

On a fait trois trains composés de machines locomotives :

Le premier, A : *Hercule, Antée*, et un tender.

Hercule était en feu et remorquait *Antée;* il avait son tender en avant et les cheminées des machines se regardaient. Poids des deux machines 48,435^{k}. Poids total 70,435^{k}.

Le deuxième train : C, *Atalante* en feu remorquait *la Flèche* et deux tenders; elles pesaient ensemble 38,100^{k}, et avec les deux tenders 58,100^{k}.

Le troisième, B : *la France* en feu remorquait *le Creusot* avec deux tenders; elles pesaient ensemble 41,200^{k}, et avec les deux tenders 61,200^{k}.

Les tenders des machines étaient placés aux extrémités, afin que le pont, qui n'a que 20^{m} de portée, fût complétement chargé par les machines. On voit que, dans ces trois trains, le premier était de beaucoup le plus lourd; aussi, dans les épreuves, on l'a successivement fait occuper les trois voies.

Tout ayant été disposé à l'avance pour les observations, on a placé un observateur sous chaque voie : un à chaque poutre de tête, un aux longerons sur les culées, et un à chaque extrémité mobile des poutres de tête.

On a d'abord enlevé les cales qui appuyaient encore le pont sur la palée en bois, puis les trois trains sont venus occuper ensemble les trois voies:

Le train A la voie de départ,

— B la voie de retour de Versailles,

— C la voie de retour de Saint-Germain.

Le stationnement des machines a été de trois minutes; les flexions observées ont été au maximum de 4^{mm} pour les pièces de pont.

Ces machines ont quitté le pont, et les poutres ont repris leur position primitive; les machines sont revenues à leur place, et on a fait une deuxième épreuve en stationnement. La flexion maxima a été

de 5^{mm}, elle correspond à la voie du milieu, qui est la plus chargée.

Après cette deuxième observation, les trains ont quitté les voies, et les épreuves ont été suspendues pendant un quart d'heure pour laisser passer les trains réguliers venant et allant à Saint-Germain, Versailles et Rouen.

On a relevé également les flexions durant le passage de ces trains, et partout elles ont été moins considérables que celles observées avec les trains d'épreuves; on a en outre remarqué que les flexions pendant le passage de la machine qui conduit un train est double de celle qui a lieu pendant le passage des voitures qui le composent.

Après le passage de ces divers trains on a repris les épreuves: le train A est venu se placer sur la voie de retour de Saint-Germain, et le train B sur la voie de départ; le train C a conservé sa place. On a fait comme précédemment stationner les trains deux minutes sur les voies.

La flexion maxima permanente a été de 5^{mm} sur la voie la plus chargée.

Après le stationnement on a fait marcher les machines à 40 kil. à l'heure, en les amenant ensemble sur les trois voies: les flexions ont été de 1^{mm} plus considérables que dans la présente observation.

Enfin on a mis le train A sur la voie de retour de Versailles, le train C sur la voie de retour de Saint-Germain, et le train B est resté sur la voie de départ.

Les épreuves en stationnement ont encore donné les plus fortes flexions sur la voie de retour de Saint-Germain, bien que ce soit la voie de Versailles qui fût la plus chargée.

Les épreuves à la vitesse de 40 kil. ont confirmé les précédentes. La remarque de flexions moins fortes sur la voie de retour de Versailles que sur celle de Saint-Germain tient à ce qu'elle est moins éloignée que celle-ci de la poutre de tête qui lui correspond.

La flexion maxima a donc été de 6^{mm} pour les voies de retour de Saint-Germain et de départ, et de 4^{mm},5 pour la voie de retour de Versailles.

Quant aux poutres de tête, les flexions ont été à peu pres constantes pendant toute la durée des épreuves: elles ont été de 2^{mm} à à 4^{mm},5.

Les extrémités de ces poutres sur la partie posant sur les galets n'a donné aucun déplacement appréciable; il en a été de même pour le renversement que pouvaient prendre les longerons placés sur les culées.

COMPOSITION DES TRAINS.

Train A.

		Charge sur le pont.	Charge totale.
Tender.	11,000^k		
Hercule	22,935		
Antée	25,500		70,435^k
Tender.	11,000	59,435^k	

Train B.

Tender.	10,000^k		
France.	20,500		
Creusot	20,700		61,200
Tender	10,000	51,200	

Train C.

Tender.	10.000^k		
Atalante	18,500		
Flèche	19,600		58,100
Tender.	10,000	48,100	

Une seconde épreuve a été faite devant MM. les Ingénieurs du contrôle, les résultats qu'elle a donnés ont confirmé les premiers obtenus.

Nous n'avons pu donner sur les planches la position des trois voies telles qu'elles existaient au moment des épreuves; mais on peut sensiblement les supposer dans la place occupée par les entrevoies du milieu du pont à quatre voies.

RÉSUMÉ DES ÉPREUVES.

DÉSIGNATION DES ÉPREUVES.	Poutres de tête, côté gauche, intérieur.	Voie de retour de Versailles.	Voie de départ.	Voie de retour de Saint-Germain.	Poutres de tête, côté droit, extérieur.	OBSERVATIONS.
1re Série d'expériences.						
Désignation des trains.		B	A	C		
1° Stationnement de 3'.	mm	mm	mm	mm	mm	
Flexion permanente.	2 1/2	3 1/2	4	4	2 1/2	[1] 1mm sous les wagons.
— au départ des machines.		4 1/2			3	[2] Vibrations assez fortes.
2° Stationnement de 2'.						
Flexion permanente.	2 1/2	2 1/2	5	3 1/2	2 1/2	[3] 1mm 1/2 sous les wagons.
— au départ.	»	»	»	»	»	
Train de Versailles, départ.		2 1/2[1]	3.5	1 1/2	»	[4] 1mm 1/2 sous les wagons.
— de Saint Germain, retour.		0 [2]	1.2	4	1.5	
— de Versailles, id.	2.5	3 [3]	»	»	0.5	[5] Wagons, vibrations seulem[t].
— de Rouen, id.	»	»	4,8	3 1/2[4]	2.5 [5]	
2e Série d'expériences.						
Désignation des trains.		B	C	A		
1° Stationnnement de 2'.						
Flexion permanente.	3	3	5	5	4.5	
— au départ.		3 1/2		6		
2° Vitesse de 40 kilomètres.						
Flexion pendant la marche (maxima).	3	4	5	6	5.5	
3e Série d'expériences.						
Désignation des trains.		A	B	C		
1° Stationnement de 2',						
Flexion permanente.	3	3	0.8	4	4	
— au départ.		4 1/2		5		
2° Vitesse de 40 kilomètres.						
Flexion maxima.	3	4	4.5	5	4.5	

DEUXIÈME PARTIE.

Les dimensions des principales parties du tablier du pont de Clichy ont été déduites, par le calcul, des données suivantes :

On sait que la plus lourde charge qui puisse être amenée sur un pont de chemin de fer serait produite par le passage simultané, sur toutes les voies qui le recouvrent, de trains composés uniquement des machines locomotives les plus pesantes. On sait aussi que cette surcharge est de 3,500 à 3,800 kilog. par mètre courant de simple voie. On a supposé qu'elle pourrait s'élever à 4,000 kilog.

En outre, on a voulu que, dans ce cas exceptionnel, les parties les plus fatiguées de la tôle n'aient à résister à la traction ou à la compression qu'à raison de 6 1/2 pour la traction, ou de 5 1/4 pour la compression.

Ce pont se trouve donc dans de meilleures conditions de rigidité que la plupart des travaux de même nature exécutés depuis plusieurs années en Angleterre.

En effet, admettre, comme le font les ingénieurs anglais, qu'une charge totale de 12 tonnes par pied, ou 4,000 kilog. par mètre de double voie, est la charge de rupture correspondant à un effort maximum de la tôle de 30 kilog. par millimètre, revient à supposer que, sous une charge de 10,000 kilog. (soit 8,000 kilog. pour la surcharge et 2,000 kilog. pour le poids permanent), la résistance que devra offrir la tôle sera de 7 kil. 1/2.

Le pont de Clichy est donc plus fort dans le rapport de 7 1/2 à 6 1/2, soit environ 1/6.

Les sections des nervures supérieure et inférieure ont été calculées d'après les formules de résistance déduites de la forme de ces sections. Elles ne diffèrent des formules connues que par la composition du terme renfermant le cube des hauteurs.

Les épreuves sont venues prouver l'exactitude de ces calculs : car

la plus grande dépression qui ait été observée dans les trains au repos a été de 4 millimètres 1/2 pour les poutrelles. En admettant que cet abaissement ne soit dû qu'à des compressions ou à des allongements réguliers, et non pas à une déformation anormale, telle qu'un affaissement de la lame, on trouve par le calcul qu'il correspond à un effort de 5 kil. 85.

L'abaissement maximum de 5 millimètres 1/2 accuse un effort de 7 kil. Il résulte du passage simultané sur les trois voies et à grande vitesse des plus lourdes machines de la compagnie, et il atteint à peine 1/5 de la charge de rupture.

Quant aux flexions des poutres de tête, elles ont été extrêmement faibles et beaucoup moindres qu'elles ne devront être lorsque les quatres voies auront été établies et que la surcharge sur ces poutres sera considérablement augmentée.

Cette très grande rigidité a pu être obtenue avec une très faible quantité de matière. Ainsi une des grandes pièces de pont pèse 1,400 kil.; elle porte, avec un effort de 6 kil. 1/2 par millimètre carré, une charge uniformément répartie de 18,220 kil.

Si l'on cherche à se rendre compte de la légèreté de ces poutres, on voit que les nombreux trous que l'on est obligé de percer pour réunir les différentes parties des pièces en tôle n'entraînent pas l'emploi d'une quantité de métal beaucoup plus grande que celle qui est réellement utile.

Pour s'en assurer, il suffit de décomposer le poids des poutres de tête de la manière suivante :

Chacune de ces fermes pèse 9,600 kil., ainsi répartis :

La nervure supérieure qui résiste à la compression pèse	2810 kil.
La lame.	4000
La nervure inférieure qui agit par traction. . . .	2700

Les rivets et couvre-joints entrent dans ce total de. . 9600 kil. pour 873 kil., soit 9 0/0, moins de 1/10. Si de 9,600 kil. on retranche ces 873 kil. et le poids du métal que l'on a dû ajouter pour

compenser l'affaiblissement dû aux trous des rivets, c'est-à-dire 17 3/4 0/0 de la nervure inférieure, ou 425 kil., on arrive à 8300 kil. : c'est ce que pèserait une poutre de même résistance que les fermes de tête du pont de Clichy, mais formée d'un seul morceau de fer.

La différence entre le poids réel de 9600 kil. et le poids de 8300 kil. représente la perte de matière qu'entraîne l'emploi des rivets et des couvre-joints pour assembler les tôles entre elles. Cette perte est de 1300 kil., ou de 13 1/2 0/0, moins de 1/7 du poids total.

On peut présenter ces mêmes chiffres de manière à rendre plus sensible l'économie qui résulte de l'emploi de la tôle en parties droites.

Si la totalité de la tôle entrant dans la nervure inférieure ou dans la nervure supérieure était intéressée dans la résistance, l'effort maximum se réduirait de 6 kil. 1/2 à 4 kil. 06 pour la traction, et de 5 kil. 1/4 à 4 kil. 1/2 pour la compression.

Si l'on imaginait une voûte en tôle construite en profitant des 9600 kil. que pèse une des poutres et en se servant des culées pour détruire la poussée, le métal ne subirait qu'une pression de 1 kil. 75, c'est-à-dire une pression égale à peine à celle adoptée pour les voûtes en fonte.

Cette poutre ne pèse donc que ce que pèserait un arc en fonte de même portée et de même flèche, et cela sans ses tympans, sans plaques de retombée, sans les brides et les boulons de jonction des différents parties, sans les pièces de contreventement.

Cette comparaison théorique se trouve justifiée par les exemples suivants.

Le pont biais du chemin de fer du Nord sur le canal Saint-Denis a 32 mètres d'ouverture. Il est construit en fonte, système Polonceau, et pèse 131621 kil., ou 4100 kil. par mètre courant. En tôle, il n'eût pesé que 2200 à 2300 kil., ou, en totalité, au plus 75000 kil. Ce pont a coûté, non compris les travaux de maçonnerie :

Fonte et fer pour boulons et accessoires. . .	78 724 fr.	
Garde-corps, fonte et fer	4 850	
Charpente.	11 861	
Échafaudages de pose.	8 500	
Total. . . .	103 935	103 935 f.

En tôle, il aurait coûté :

75,000 kil. à 80 c. ou.	60 000	
Platelage, longerons, etc.	5 600	
Peinture.	3 400	
	69 000	69 000

Différence en faveur du pont en tôle. . . . . 34 935 fr.
soit 34 0/0 du prix du pont en fonte.

Nous avons pris cet exemple parce que, de tous les ponts en fonte de même portée qui ont été établis en France, le pont de Saint-Denis est le plus léger.

Le tablier du pont de Clichy, qui fait l'objet de ce mémoire, a été étudié en fonte, et le poids total du projet définitivement arrêté, et sur lequel les fondeurs ont été appelés à soumissionner, était, pour le pont à trois voies, de 97,000 kil., soit, pour quatre voies, environ 130,000 kil. La Compagnie aurait eu à payer pour le pont en fonte, en mettant le kilogr. de métal à 35 c., une somme de 45,000 fr., tandis qu'il a été exécuté pour 36,000 fr., et ce prix était plus avantageux pour le constructeur que celui de la fonte.

Cette comparaison a été faite en Angleterre, où plusieurs centaines de ponts en fer ont été construits depuis cinq ou six ans.

Voici comment les ingénieurs la résument.

Le tablier en tôle ne pèse pas la moitié du poids du tablier en fonte, et coûte, au kilogramme, à peine le double, soit une économie du quart au moins sur le prix de la fonte ; de plus, les poutres droites n'exerçant pas de poussée, les maçonneries deviennent plus

légères ; le montagne des poutres est simple et facile; il ne demande pas de dispendieux échafaudages.

La proportion entre le prix de la fonte et celui de la tôle, l'une et l'autre ouvrées, est la même en France qu'en Angleterre, et l'économie résultant de l'adoption de ce genre de construction reste par conséquent la même.

Voici les principaux résultats de nombreuses expériences qui ont été faites dans les ateliers de M. Gouin et C°, constructeurs du pont, sur la résistance à la traction de tôles de diverses provenances et sur celle des rivets.

Les tabliers en tôle offrent encore un avantage sur lequel on ne saurait trop insister. Le peu de hauteur que l'on peut donner aux pièces de pont qui portent la voie permet de n'avoir comme épaisseur totale au dessus des rails, au dessous des poutres, que 35 à 40 centimètres.

Comme il arrive souvent qu'on est obligé d'élever le niveau des rails aux passages des rivières et des canaux, afin de laisser au dessous du pont une hauteur suffisante à la navigation, l'emploi de la tôle permettra de se rapprocher de cette hauteur. De là réduction des pentes aux abords des voies navigables, réduction dans les cubes des remblais et économie importante dans la construction des chemins de fer. Pour procéder en toute sécurité à la construction du pont de Clichy, dont ils garantissaient à la compagnie la sécurité, les constructeurs ont voulu comparer sous le rapport de la résistance les tôles qu'ils comptaient employer aux tôles anglaises entrant dans les constructions de même nature.

Les tôles qu'ils comptaient employer pour la construction du pont de Clichy étaient des tôles d'Imphy. On avait le choix entre des tôles de fonte au bois, affinée à la houille, et des tôles de fonte au coke, affinée aussi à la houille; on a rompu des échantillons de ces deux espèces, et, plusieurs mois après, les mêmes expériences répétées sur de nouvelles tôles fabriquées de la même manière ont donné les mêmes résultats.

Voici l'épreuve à laquelle on soumettait ces tôles.

Chacune des feuilles était découpée en plusieurs bandes de 25 à 40 centimètres de longueur, à section carrée de 16 millimètres de côté, terminée à chaque extrémité par une partie plus large percée d'un trou.

Une bande suspendue à une grue était chargée directement au moyen de barres de fer pesant 25 kilog. l'une, jusqu'à ce que la rupture arrivât ; à chaque addition d'un nouveau poids, on mesurait l'allongement.

On a éprouvé, de cette manière, des bandes découpées dans le sens et en travers du laminage.

Voici les principaux résultats de ces expériences :

Tôle d'Imphy, fonte au bois affinée à la houille, tirée parallèlement au laminage :

Poids de rupture minimum, 3083 k. par c. q.
— maximum, 3731 —
— moyen, 3313 —

Allongement au moment de la rupture :

Minimum	3mm,9	0/0
Maximum	5, 12	
Moyen	4, 6	

Même tôle tirée perpendiculairement au laminage :

Poids de rupture minimum, 3072 k. par c. q.
— maximum, 3376 —
— moyen, 3240 —

Allongement au moment de la rupture :

Minimum	1mm,8	0/0
Maximum	2, 5	
Moyen	2, 14	

Tôle, fonte au coke affinée à la houille, tirée parallèlement au laminage :

Poids de rupture minimum, 3230 k. par c. q.
— maximum, 4340 —
— moyen, 3657 —

Allongement mesuré après la rupture :

Minimum	2mm,8	0/0
Maximum	5, 06	
Moyen	4, 31	

Même tôle tirée perpendiculairement au laminage :

Poids de rupture minimum, 2778 k. par c. q.

— maximum, 3002 —

— moyen, 2906 —

Allongement mesuré après la rupture :

Minimum	0mm,76	0/0
Maximum	1, 30	
Moyen	1, 12	

Le fait le plus saillant que l'on ait déduit de ces chiffres est que la tôle d'Imphy fabriquée avec de la fonte au coke résiste mieux à la rupture que celle fabriquée avec de la fonte au bois, et cela dans la proportion de 3657 à 3313.

Ce résultat des premières expériences, si différent de ce que l'on attendait, a conduit à les recommencer; de nouvelles tôles venues de l'usine, rompues à leur tour, accusèrent la même résistance.

On voit donc que l'allongement des tôles de fontes au coke est le même que celui des tôles de fontes au bois.

Les poids produisant la rupture des tôles en travers du laminage signalent ce fait assez singulier que, dans les tôles de fontes au bois, la résistance à la traction perpendiculaire aux fibres est à peine inférieure à celle parallèle aux fibres.

Dans les tôles provenant de fontes au coke, au contraire, la différence est beaucoup plus grande.

Ainsi, de 3657 kil. la résistance à la traction dans le sens du laminage descend à 2906 kil.

On voit que l'allongement est toujours plus grand dans le sens des fibres que dans le sens perpendiculaire.

Lorsqu'on a dû déterminer le nombre des rivets des joints de la nervure inférieure, on a voulu vérifier les résistances indiquées par

les auteurs anglais, et de nombreuses expériences en ont montré l'exactitude.

Voici comment on a opéré :

On a fait tourner de petites tringles en fer corroyé, dit extramartelé de Grenelle (c'était le fer qui devait être employé pour la fabrication des rivets), à des diamètres de 8, 10, 12 et 16 millimètres.

Ces petits morceaux de fer étaient insérés, en guise de goupilles ou clavettes, dans une fourchette et dans sa partie mâle. Ces pièces étaient en acier trempé, exactement alésées. Au moyen de poids ajoutés successivement, on les tirait en sens contraire jusqu'au complet cisaillement des petites broches.

Les poids suspendus, au moment de la rupture, ont été divisés par le nombre de centimètres compris dans la double section de la broche, et l'on a trouvé les résultats suivants :

Broch. de	8mm	moy. de	10	expériences	3270 kil.
Id.	10	id.	10	id.	3155 id.
Id.	12	id.	10	id.	3148 id.
Id.	16	id.	10	id.	3183 id.

Le même fer tiré longitudinalement ne cédait qu'à une charge de 4,000 kil.

On avait remarqué que, quand les petites broches remplissaient exactement les trous de la fourchette et de la partie mâle, si, de plus, l'ajustage de ces deux pièces était très exact, le morceaux semblaient indiquer qu'elles avaient été comme pliées avant de se rompre. Alors on a introduit dans les fourchettes de nouvelles broches de 0m.016 chauffées au rouge, et on les a rivées. Les tringles, en se refroidissant, se raccourcissaient et serraient fortement la fourchette ; elles se trouvaient alors dans des conditions à fléchir moins facilement, et en effet, le poids de rupture est remonté de 3133 kil. par centimètre carré à 3355 kil.

On a vérifié si des rivets réunissant trois tôles comme dans les poutres du pont et rompus de même donneraient les mêmes résul-

tats. De nouvelles expériences ont démontré que l'irrégularité du trou fait par le poinçon de l'emporte-pièce, le peu de dureté de la tôle, comparée à la pièce d'épreuve en acier trempé, le remplissage incomplet du trou par le rivet; en un mot, que toutes ces imperfections, inséparables de l'exécution de grands travaux, diminuaient la résistance au cisaillement des rivets dans la proportion de 3354 kil. par centimètre carré à 2415 kil. C'est de ce dernier chiffre que l'on est parti pour la détermination du nombre de rivets des couvre-joints de la nervure inférieure.

Enfin, on a fait quelques expériences sur la force nécessaire pour faire glisser l'une sur l'autre des tôles serrées par la compression des rivets mis à chaud et rapidement écrasés. Une tôle percée d'un trou ovale était prise entre deux autres, le tout réuni par un rivet de 18 millimètres; une traction était opérée sur la tôle du milieu dans un sens et une traction contraire sur les deux autres. La force nécessaire pour produire un commencement de glissement ne fut jamais inférieure à 3000 kil.; plusieurs fois elle s'éleva au dessus de 4000 kil.

Il suffit que chacun des rivets des joints de la nervure inférieure au pont de Clichy produise une résistance au glissement de 2800 kil. pour que ces rivets n'aient jamais à résister au cisaillement.

Note sur la fabrication des produits réfractaires,

Par M. PETITGAND.

Sous le nom générique de *Produits réfractaires* nous comprenons tous les matériaux et appareils qui, dans les arts, et dans la métallurgie notamment, peuvent supporter les températures les plus élevées sans se fondre, ou qui sont capables d'y résister pendant un temps déterminé sans s'altérer sensiblement : tels sont les cornues, les creusets et les briques, employés dans la construction des fours de toutes sortes, à l'essai ou au traitement des divers métaux, ainsi qu'à la confection d'objets destinés aux usages domestiques : ces emplois si variés indiquent suffisamment toute l'importance des produits réfractaires. De leur qualité dépendent souvent la réussite d'une opération, celle d'un traitement, et, la plupart du temps, les pertes ou les bénéfices des nombreuses industries qui les emploient.

La fabrication du verre, celle de l'acier, la réduction des minerais de zinc, les arts céramiques (qu'il s'agisse de briques ou de creusets), y puisent les éléments essentiels à leur bonne marche, à leur succès, et quelquefois même à leur existence.

On a créé, pour la fabrication de ces produits, plusieurs établissements spéciaux, qui peuvent, chacun dans leur genre, satisfaire aux besoins des industries auxquels ils s'adressent. Mais, éloignés des usines pour lesquelles ils travaillent, leurs produits amenés à pied d'œuvre coûtent très cher, et, en outre, ce qui est plus grave, ils ne remplissent qu'imparfaitement les conditions auxquelles ils doivent satisfaire, parce que la plupart du temps ceux qui les fabriquent ignorent les éléments des opérations auxquelles ces produits sont destinés. Les matières propres à cette fabrication sont si généralement répandues que l'on peut presque partout se suffire à soi-même. Il est d'ailleurs certaines industries pour lesquelles la fabrication des

appareils qu'elles emploient est une nécessité par suite des soins minutieux qu'exigent des manipulations préparatoires.

Ces considérations font comprendre quel intérêt présentent la fabrication des briques et celle des creusets.

Les produits réfractaires s'obtiennent au moyen d'*argiles* dites *apyres* ou *plastiques*, ou mieux réfractaires, mélangées avec *des ciments*.

Les argiles se trouvent partout, plus ou moins abondamment. Les ciments ne se rencontrent qu'accidentellement; ils sont plutôt des produits artificiels, et proviennent le plus généralement d'appareils éprouvés par des températures successives et très élevées.

C'est du mélange, ou, si l'on aime mieux, de la combinaison de ces deux éléments, en proportions variables, qu'on obtient les briques, les creusets, les cornues de distillation, etc., etc.

Examinons rapidement les caractères généraux *des argiles*.

§ I. — Des argiles.

Les terres *apyres* ou *argiles réfractaires*, qu'on désigne également sous le nom de terres *plastiques* (1), sont celles où la silice et l'alumine combinées constituent les bases essentielles : ce sont des silicates d'alumine, qui doivent leur principe et leur degré de *réfractibilité* à cette combinaison, et peut-être plus encore à leur mode d'agrégation, comme divers résultats le font supposer.

Les argiles réfractaires sont infusibles par elles-mêmes, sans être pures, car presque toutes contiennent en mélange intime le fer oxidé, la chaux, la magnésie, le fer sulfuré, les bitumes, le quartz, etc.

Bien que composées toujours à peu près des mêmes substances, elles n'ont réellement aucune partie essentielle; l'alumine qu'elles

(1) Peut-être à tort, parce que diverses argiles fusibles ocreuses possèdent aussi la plasticité, sans laquelle elles resteraient sans emploi.

renferment est souvent en si faibles proportions, que telle pierre rangée sous le nom d'argile ne pourrait être classée dans les pierres alumineuses. Elles ne peuvent donc former des espèces minéralogiques dont les caractères sont faciles à apprécier par la constance et la fixité de leurs bases. Les variétés de l'argile sont si nombreuses et diffèrent si fréquemment d'un point à l'autre qu'il est impossible de les déterminer avec exactitude. On peut dire qu'il n'existe pas deux couches d'argile qui se ressemblent parfaitement; très souvent même les diverses parties d'une même couche présentent des différences notables et qui sont telles qu'elles influent sur l'emploi qu'on en veut faire.

Les caractères des diverses argiles sont si vagues et si incertains, que pour les désigner on se borne à leur donner le nom de la localité qui les produit. Pour celui qui les manie fréquemment, pour l'ouvrier qui les exploite ou les travaille, l'habitude et la routine sont presque toujours le seul guide pour apprécier et discerner, par la vue, par un simple toucher, les variétés et les nuances qui existent d'une terre à l'autre. On n'arrive à cette espèce de tact qu'à la longue; et, pour aider à les reconnaître, il a fallu, en l'absence de caractères saillants et précis, réunir les signes accessoires, qui peuvent se résumer dans les indications suivantes.

Les *argiles réfractaires* ne font pas effervescence avec les acides: elles se délaient dans l'eau, forment bouillie et constituent des pâtes qui, s'allongeant sans se briser, présentent une sorte de ductilité. Desséchées, elles restent solides; dures, elles se brisent en éclats sans friabilité; elles ont une affinité extrême pour l'eau, l'absorbent avec une sorte de sifflement et happent à la langue. Elles durcissent au feu, y éprouvent un retrait considérable, ce qui est dû en partie à l'eau qu'elles contiennent; sous cette influence, elles blanchissent, acquièrent une sorte de transparence, et font feu au briquet, circonstance qui ne se reproduit ni avec les marnes ni avec la craie.

Quand elles sont fraîches, elles ont une odeur particulière due à des débris organiques; elles sont onctueuses, douces au toucher, lian-

tes; elles se polissent sous l'ongle et se laissent rayer par lui; elles se taillent, avec le couteau, en rubans, et présentent l'aspect de la corne, avec une légère transparence aux bords.

Par l'analyse, on trouve, ou beaucoup d'alumine sans terres étrangères, ou beaucoup de silice et très peu de fer et de chaux.

A l'état naturel, leur couleur est le blanc, le gris, le noir, l'ardoise, le blanc perlé et le blanc rosé; elles sont compactes, collantes et très tenaces.

La *silice* en excès les rend âpres et leur ôte leur liant et leur ténacité.

La *magnésie* leur procure une très grande onctuosité, les rend comme savonneuses, mais non pas fusibles, comme on l'a cru.

La *chaux* leur communique une espèce de sécheresse et les fait fondre.

Le *fer*, les *pyrites*, en les colorant en rose, en vert ou en ocre, leur donnent aussi de la fusibilité.

Les teintes grises, brunes ou noirâtres qu'elles revêtent, sont dues vraisemblablement à la présence de matières organiques ou *bitumineuses*: telles sont celles qui avoisinent, comme en Belgique et sur le Rhin, les terrains houillers. Ces signes extérieurs sont sans importance et n'influent en rien sur les qualités réfractaires de ces terres, qui d'ailleurs passent presque toujours au blanc après une cuisson active.

On remarquera que plusieurs de ces caractères s'appliquent aux argiles qui n'ont aucune vertu réfractaire. Ce n'est que par les épreuves du feu et les essais dont nous parlerons qu'on parvient à discerner ce qui leur manque et quelle est leur véritable nature.

Gisement. — Les argiles, quelles qu'elles soient, se trouvent dans tous les terrains, dans toutes les positions possibles, tantôt au milieu de couches de calcaire, tantôt au milieu de matières arénacées, ici dans les roches cristallines, là au fond des tourbières, souvent en masses puissantes ou disséminées, sans suites, sans régularité. Ces dépôts se sont formés successivement et se forment encore de nos jours. Est-ce à ces circonstances diverses de formation qu'il faut attribuer,

ainsi que je l'ai mentionné plus haut, ces différences de qualités et de propriétés contraires qu'on rencontre d'une couche à l'autre et souvent à un même banc d'argile? Il est permis de le croire, et, sans discuter cette hypothèse, la fréquence de ces accidents exige une très grande circonspection dans l'emploi des argiles; il faut des essais nombreux et des combinaisons nouvelles pour obtenir de bons résultats.

Leur manière d'être dans les divers terrains est assez différente.

Dans les terrains primitifs, où elles sont plus rares, elles forment au pied des roches qui les dominent de petites collines mamelonnées, affleurant au jour, et sur lesquelles la végétation manque entièrement. C'est là que l'on rencontre les *kaolins*, dus à la décomposition des roches feldsphatiques; ce qui distingue cette argile des autres, c'est que la silice et l'alumine y sont ordinairement en proportions presque égales. Les autres roches cristallines donnent également naissance à des argiles qui ont assez d'analogie avec elles par leurs bases.

Elles se trouvent aussi dans les terrains volcaniques, ce qui a fait croire qu'elles étaient le résultat de la décomposition des laves.

Dans les terrains secondaires, elles sont rarement à la surface du sol; elles ne forment que des amas bornés, offrant communément une teinte blanchâtre; la silice y est dominante : telle est la terre de Lingen'auer, dans le canton de Berne, en Suisse, qui ressemble à du grès décomposé.

C'est dans les terrains de transport, à la base de la formation tertiaire inférieure, qu'elles sont les plus communes et les plus abondantes; mais alors elles sont moins pures : les pyrites dont elles sont imprégnées, ainsi que d'autres substances, altèrent leur réfractibilité. Elles sont en couches, en amas, et remplissent les cavités formées dans les masses calcaires; les terres végétales qui les recouvrent ont des profondeurs qui vont à 8, 10 et quelquefois 20 mètres. Tels sont les gisements d'*Andennes*, en Belgique; de *Valendar*, près de Coblentz; de *Stourbridge*, en Angleterre; de *Val de Pénas*, en Espagne, ceux de la Bohême, etc., etc.

Indépendamment des causes qui altèrent les qualités réfractaires des argiles et qui ont été indiquées, savoir : la présence du fer oxidé, des pyrites et de la chaux, il y en a d'accidentelles qui viennent les dénaturer, quand elles ne les rendent pas tout à fait impropres aux usages auxquels elles sont réservées : c'est l'incurie, la malpropreté apportée à leur extraction, à leur emmagasinement, qui nécessitent l'introduction des substances étrangères, et qui altèrent leurs qualités. La façon dont elles sont désséchées, l'irréflexion qui préside à leur emploi, et souvent l'ignorance des traitements auxquels elles doivent aider, leur enlèvent leurs propriétés.

L'analyse chimique des argiles peut nous éclairer sur leur composition, sur leurs principes constituants, mais elle est insuffisante pour leur mise en œuvre, et peut entraîner à des errements inutiles, ou pour le moins coûteux. On ne saurait être fixé sur leurs qualités qu'à la suite d'essais pratiques, à force de tâtonnements, soit en les expérimentant isolément, soit en les mélangeant les unes avec les autres : quoique de qualités inférieures, une fois amalgamées leur valeur et leurs propriétés se modifient totalement. Ainsi, la terre d'*Abondant* près de Dreux, employée seule, fournit des creusets médiocres ; mais quand elle est mélangée aux argiles d'*Andennes*, elle donne des appareils qui ne le cèdent en rien à ceux si réputés de Hesse. Il en est de même des produits fabriqués par Beauffay et Deyeux. L'argile d'*Angleurs* près Liége (46 de silice, 36 d'alum. et 0 de fer), de composition presque identique avec celle de *Gross-Almérode* (46 de silice, 35 d'alomine et 3 de fer), résiste à peine, tandis que la seconde sert à faire les creusets dits de Hesse. Les argiles de *Forges, Montereau, Saint-Etienne*, présentent, mises en regard de celles de *Valendar* près Coblentz, les mêmes particularités : les premières sont excellentes, la dernière est plus que médiocre et ne peut s'employer seule, et cependant l'analyse indique pour elles toutes les mêmes bases. Evidemment les effets contraires sont dus au mode d'agrégation dans lequel les argiles se sont formées.

Méthodes d'analyse. — Les méthodes usitées pour l'analyse des

argiles sont fort simples et ne nécessitent ici aucune nouvelle description ; elles sont indiquées dans les différents traités de docimasie. Mais comme on n'a pas toujours un laboratoire à sa disposition, et que souvent le temps manque, il y a un moyen qui est à la portée de tous, et surtout très expéditif.

On prend gros comme un pois de la terre à essayer ; on la délaie dans une tasse, de façon à l'obtenir bien divisée et sous forme de bouillie claire ; on l'étend sur une bande de papier préalablement graissée, sans quoi elle pourrait tellement y adhérer qu'on ne pourrait plus l'en détacher ; on fait sécher cette bande de papier sur une plaque de tôle posée sur un réchaud ou au dessus de la flamme d'une lampe ; dès que la chaleur a traversé le papier, l'enduit terreux se lève en écailles, qu'on dépose dans une petite capsule. On saisit ensuite un fil de platine, pourvu à son extrémité d'une parcelle d'argile, qu'on sait déjà être très réfractaire ; on met cette extrémité en contact avec une des écailles paraissant la plus avantageuse à l'opération ; aussitôt qu'elle a adhéré à l'argile, on prend un chalumeau d'une main et de l'autre on approche le platine de la flamme d'une lampe ; on commence par rougir le fil par le milieu, et graduellement on l'amène à une chaleur suffisante pour introduire entièrement la partie garnie d'argile jusqu'au milieu de la flamme. Lorqu'on suppose l'échauffement assez fort, on dirige le dard sur la boulette d'argile, et d'après la résistance que présente la petite écaille qui y est attachée on juge du degré de fusibilité de la terre. Ce procédé est très sûr : en effet les terres fusibles se convertissent en globules boursouflés, scoriacés, en moins de 2 à 3 minutes ; tandis que les argiles réfractaires se forment en une espèce de porcelaine plus ou moins translucide, plus ou moins colorée, selon la nature et la pureté des terres. Cette méthode, qui offre une grande promptitude, ne saurait être une analyse rigoureuse, car elle n'indique pas les substances et les proportions qui constituent l'argile essayée ; mais elle suffit à constater si cette argile est ou non réfractaire et peut servir à la composition des produits réfractaires.

Les moyen empiriques qui conduisent au même but sont très divers. Ils se fondent sur l'appréciation de faits journaliers, sur mille observations relevées par ceux qui mettent en œuvre. Ces indications, insignifiantes en apparence, reposent cependant sur des expériences et des résultats de chaque instant. Comme nous l'avons dit précédemment, toutes ces remarques diffèrent d'un point à un autre et sont nécessairement locales. Il faut donc en généraliser les caractères les plus vulgaires.

Les argiles réputées pures (fait accidentel) sont blanches, et sont les meilleures. La pratique contredit cette théorie : très souvent elles éclatent et ramollissent au feu ; sèches, c'est-à-dire sans douceur, sans moelleux, se granulant sous le doigt, elles doivent être rejetées ou employées avec réserve. Celles qui présentent des teintes grise, ardoisée, blanc sale nacré, noire ou offrant des paillettes de mica, sont les plus communes ; elles sont réputées mauvaises lorsqu'elles sont sèches, quand la cassure a un aspect terne, grenu, analogue à celui que présente le plâtre. Elles sont considérées de meilleur choix lorsque les fractures donnent de petites aspérités pointues, translucides ; quand elles sont onctueuses, collantes, happant bien à la langue ; lorsque, placées sous la dent, on n'y sent aucun grain ; lorsque le morceau, rayé par l'ongle, présente une ligne sans *brisures*, une trace unie, presque *huilée* ; quand, calcinées dans un four quelconque, elles blanchissent sans prendre de teinte rougeâtre, sont sonores, éprouvent peu de retrait, et se divisent en fragments irréguliers et couverts d'aspérités. Ce sont des indices qu'elles sont bonnes et que la silice y domine ; lorsqu'on y rencontre des parties à aspect vitreux et bleuâtre, dures et sans traces de scorifications, on peut être sûr alors que c'est l'alumine qui y est la plus abondante.

Mais s'il y a doute, s'il n'y a pas de signes assez décisifs, on prend un morceau de l'argile douteuse, parfaitement sec, on l'échauffe lentement et graduellement au feu de forge, et, lorsqu'elle a commencé à rougir, on la maintient au feu le plus intense du soufflet pendant une demi-heure à trois quarts d'heure. Si l'argile sort de cette

épreuve sans ramollissement, ni boursouflures, ni vitrifications, on peut l'employer sans hésitation.

Le moyen suivant est plus scientifique ; il est usité dans les fabriques en activité.

On prend un morceau d'argile, on en calcine la moitié ; on broie chaque partie séparément, on les mélange ensuite intimement, on les humecte et on les pétrit ensemble ; on fabrique avec cette pâte un cylindre de 0m.24 de longueur sur 0m.030 de diamètre ; on le lisse avec soin, et on le sèche dans l'étuve. On place ensuite ce cylindre dans un four à réverbère, en posant les extrémités sur des briquettes élevées au-dessus de la sole de 10 à 12 centimètres, et l'on chauffe au maximum de température pendant cinq à six heures et souvent plus. Si le cylindre ne vernit pas, s'il ne fléchit pas dans le milieu, s'il résiste à une pression de 15 à 20 kilogr., si, sorti du four, il ne se fend pas, même à un courant d'air ; si la cassure, lorsqu'on le brise, est nette, sans vitrification, sans émail, cette terre réunit toutes les qualités désirables.

J'ai dit que des argiles, d'ailleurs très réfractaires, éclataient à l'usage. On peut parer à ce vice par l'addition de diverses substances, par exemple le verre, le muriate de magnésie, la *dolomie* (chaux carbonatée magnésifère, talkspath), qu'on rencontre dans les roches talqueuses, blanches, compactes, mais toutes en proportions très faibles, qui ne peuvent s'établir qu'à la suite de tâtonnements réitérés.

Il suffit d'indiquer ces caractères. Le nombre en est considérable. D'autres peuvent se présenter avec des argiles d'autres pays ; on adoptera d'abord ceux qui viennent d'être indiqués, parce qu'ils ont pour eux la sanction de l'expérience. On sait que les argiles fondent toutes à une température déterminée quand on y ajoute les 0.5 de leur poids d'acide borique, ou la moitié de ce même poids de carbonate de potasse ou de carbonate de soude. Il s'ensuit que l'argile qui reçoit la plus forte proportion de ces sels, sans entrer en fusion est d'autant plus réfractaire qu'elle en exige davantage, et

que, moins elle en prend, plus elle est fusible. Cette méthode d'essai s'emploie assez dans les verreries, principalement en Bohême et en Bavière.

§ II. — Des Ciments.

Les ciments sont des matières infusibles par elles-mêmes, dont le retrait est nul ou à peu près, et qui ont déjà supporté, souvent à diverses reprises, les températures les plus élevées. Ils sont fournis par les vieux appareils et les débris de briques, de creusets et de gazettes, soigneusement nettoyés, dépourvus de scorifications, d'émail et de parties vitrifiées. On les obtient aussi en calcinant dans des fours, dont nous parlerons plus loin, les argiles que l'on trouve à sa disposition. On donne la préférence aux plus *siliceuses*. On les appelle alors ciments *naturels*. Parmi les ciments *artificiels*, on range le quartz, les sables quartzeux, la serpentine, le talc, le graphite, tous préalablement calcinés, et souvent (suivant les usages) lavés. Le cock, les escarbilles provenant des charbons sans pyrites, peuvent aussi s'employer avec avantage comme ciment.

Les ciments de diverses sortes, répartis en telles proportions que l'expérience détermine, forment la base essentielle des nouveaux appareils. Sans ciment, pas de briques, pas de creusets, sauf de rares exceptions, ou du moins les appareils n'ont que des chances incertaines de succès et de durée (1).

Les ciments se préparent au moyen de bocards, ou, ce qui vaut mieux, de meules verticales en pierre dure ou en fonte, comme celles dont on se sert dans les huileries. On peut les diviser en trois classes, selon le plus ou moins grand nombre de trous percés par centimètre carré dans les tamis employés à les réunir.

---

(1) On fait avec une argile grossière appelée launa, provenant de la décomposition des roches schisteuses et talqueuses qui accompagnent tous les gisements de l'Espagne, de Carthagène à Malaga, et sans addition de ciment, des briques remarquables par leur durée et leur réfractibilité.

Le n° 1 sera fourni par un tamis percé de 80 à 120 trous.

— 2 par des tamis de 14 à 16 trous.

— 3 par des tamis de 4 à 8 trous.

Ces échantillons nous ont paru les plus généralement usités dans la fabrication des briques, des creusets d'acieries et des pots de verrerie. Le grain peut être plus fin pour des appareils à dimensions moindres, tels que creusets de laboratoire; il dépend nécessairement des usages auxquels les appareils sont destinés. Il est inutile de faire remarquer qu'une extrême propreté doit présider à toutes les manutentions que ces matières ont à subir, et qu'il faut éviter l'introduction de tout corps étranger, car c'est souvent détruire toutes leurs qualités.

Les ciments, avec une partie du n° 2, sont destinés aux briques; le n° 1, avec une partie du n° 2, convient mieux aux autres appareils. Mais ces données n'ont rien d'absolu ; elles doivent subir les modifications que les circonstances où l'on se trouve peuvent et doivent nécessairement amener en changeant de localité et d'emploi.

Les ciments trop grossiers (à moins qu'il ne s'agisse de briques de fortes dimensions, pour les foyers, par exemple) donnent des pâtes inégales, peu homogènes, se travaillant très difficilement; les appareils qui en sont faits sont poreux et sans flexibilité. Trop fins, ils font éclater les appareils, en ne permettant pas les variations brusques de température, de sorte que leur dilatation n'est pas suffisante, et que leur grand poids détermine un affaissement lorsque, comme dans la fabrication du zinc (procédé belge), le creuset est suspendu. Il est donc très important d'éviter ces deux écueils. D'après de nombreuses observations, nous avons remarqué que la proportion des ciments qui entrent dans une composition doit ainsi s'établir : 3/5 du n° 1, avec 2/5 du n° 2.

La terre grossièrement broyée se cuit quelquefois en gazettes. Un tel ciment n'est pas toujours d'un bon usage, d'abord parce qu'il est nécessairement très irrégulièrement calciné (inconvénient assez grave, parce qu'on n'est jamais bien fixé sur l'homogénéité des élé-

ments qui concourent à la fabrication d'une pâte), et ensuite parce qu'il coûte plus cher, car il nécessite plus de manipulations. Ce système est cependant adopté dans diverses usines, sous le prétexte très hasardé qu'on a des ciments *plus purs*.

Ce qui précède s'applique aussi, quant aux modes de préparation, aux ciments appelés *artificiels;* ils entrent dans les pâtes en proportions moindres, et toujours alliés aux ciments naturels.

§ III. — Préparation des argiles.

Les argiles doivent se dessécher lentement, et, autant que possible, à l'air libre, dans des hangars soumis à une ventilation constante ; il faut ensuite les éplucher, c'est-à-dire les concasser en petits morceaux pour enlever les corps étrangers, tels que le bois, les pierres, les pyrites et les oxides de fer, qu'elles renferment plus ou moins; ensuite on les broie par un procédé quelconque, et on les tamise; il vaudrait mieux les moudre. On appréciera facilement les motifs de ces préliminaires. Une terre qui dessèche spontanément conserve toutes ses propriétés, ce qui n'a pas lieu quand on la sèche dans des fours, où il arrive toujours que certaines parties sont calcinées. Moulues, elles assurent aux mélanges plus d'intensité, plus d'homogénéité, conditions indispensables pour obtenir de bons produits.

D'autres fois, on les concasse et on les délaie dans des cuves remplies d'eau, au moyen de patouillets et de cuves à débourber, comme ceux qui sont employés dans les faïenceries ou les usines. On les amène ainsi à l'état de bouillie, qu'on fait passer à travers des tamis de laiton pour retenir les graviers et les débris végétaux qu'elles contiennent; on les fait ensuite passer dans une série de tonneaux ou de bassins ; après quelques jours de repos, dont le nombre varie avec la division qu'elles ont subie, on décante, pour les mêler en temps utile avec les matières qu'on veut leur associer. Cette méthode, très bonne, du reste, indispensable même dans les arts céra-

miques, est plus longue et plus dispendieuse que la première ; elle nécessite un matériel et des emplacements considérables, qu'on n'a pas toujours à sa disposition, et que ne possèdent pas ordinairement les usines affectées à la fabrication des appareils réfractaires, ou celles qui doivent, par leur nature, y recourir. Il ne permet pas d'ailleurs, à notre avis, des mélanges aussi réguliers que ceux dont nous allons parler. Quant aux qualités qu'il procure, nous les croyons très incertaines ; il oblige, il est vrai, à un marchage plus prolongé, et c'est cette opération mécanique qui en fait le seul mérite.

Dans plusieurs localités, à leur sortie de la fosse, on laisse les terres extraites exposées sur des aires bien pavées, pendant des mois et souvent des années, aux alternatives du chaud, du froid, du soleil et de la pluie. Cette *préparation atmosphérique* donne les meilleurs résultats. Ces argiles deviennent plus souples, plus liantes, et acquièrent une douceur qu'on ne leur soupçonnait pas auparavant. Pour quelques unes c'est une condition d'emploi ; on fera bien d'y recourir toutes les fois qu'on le pourra. Les argiles de Snecberg, en Saxe, de Memmingen, en Bavière, qu'on lave encore après, subissent toutes cette préparation. Tels sont aussi les kaolins, et, en général, les argiles provenant de la décomposition des roches pegmatiques, qui entraînent constamment avec elles des débris des corps qui leur ont donné naissance.

En somme, il ne faut négliger aucun des moyens naturels ou mécaniques qui concourent à l'amélioration des argiles. Souvent on peut se les procurer à peu de frais, et, de plus, ils exercent une influence réelle sur la fabrication des produits les plus communs, aussi bien que sur celle des produits les plus recherchés.

§ IV. — Des pates.

Les proportions à déterminer pour la composition d'une *pâte,* tant en ciments qu'en argiles, sont très variables et sont basées sur leur nature respective et sur les usages auxquels l'appareil est destiné.

Ainsi l'on met d'autant plus de ciment que la terre nouvelle, qu'on nomme aussi en certains lieux, avec raison, *boue d'alliage*, est plus *grasse*, plus *longue*, ou, en d'autres termes, plus alumineuse, et d'autant moins qu'elle est plus *sèche*, plus *courte*, c'est-à-dire plus siliceuse.

La quantité et la grosseur des *ciments* augmentent ou diminuent selon que les appareils sont plus grands ou plus petits; mais alors il faut donner plus d'épaisseur aux vases qui demandent une pâte maigre et plus de volume si ce sont des corps pleins qu'on veut obtenir : on remplace, en quelque sorte, la cohésion chimique par une cohésion mécanique.

Jusqu'à ce que l'expérience ait guidé sur les propriétés de chacun des éléments, qu'on ait étudié les fonctions des appareils, c'est-à-dire s'ils ont à produire de l'acier ou du verre, s'ils doivent simplement garnir les parois d'un foyer, s'ils seront employés inclinés, droits, suspendus ou reposant sur une sole, on peut admettre pour bases générales les proportions suivantes :

3/5 ou 2/3 de ciment, sur 2/5 d'argile neuve ou d'alliage, ou 1/3 d'argile.

Presque toutes les compositions se rapprochent de ces deux termes.

Presque toujours on mesure en volume, et non en poids, les matières qu'on met en œuvre, à cause de leurs densités différentes, qui amèneraient des effets opposés. S'il s'agit de traiter des matières plombeuses ou saturées de fer, les éléments à base d'alumine sont préférables; on choisit au contraire ceux où la silice prédomine pour la fabrication de l'acier, du verre, du zinc, etc., et pour les briques de foyer. Ce principe n'a encore rien d'absolu : la nature des argiles offre tant d'anomalies qu'il peut se modifier d'une localité à une autre, et que de plus les effets sont la plupart du temps en contradiction avec ce que les théories indiquent.

Car, si l'on suppose que les parties alumineuses prédominent ou soient seulement en parties égales, il y aura ramollissement et fusion des appareils; et, quoique les substances que l'on a à traiter soient la

plupart *basiques* et attaquent ainsi plus vite la silice que l'alumine, on préfère néanmoins les pâtes à excès de ciment (silice), parce que physiquement elles résistent davantage, tout en étant plus sujettes à la corrosion. Les ciments sont en quelque sorte les nervures des matières alcalines ou métalliques qui *retiennent par adhérence l'argile recueillie et l'empêchent de s'affaisser*.

L'excès de ciment peut détruire la fusibilité d'une argile; les oxydes de fer, et plus encore, les traces de chaux, ont une fâcheuse influence. Telle argile formée d'après l'analyse des meilleurs éléments se fond rapidement, ne peut résister avec un 1/2, 1 1/2 à 2 p. 100 d'oxyde de fer (Valendar, 1er exemple), tandis que telle autre qui en renferme de 7 à 8 et plus (celle de Savanas, près Saint-Etienne) fournira les appareils les plus résistants.

Tels sont les principes généraux; la pratique seule apprend ce qu'il convient de faire. Il faut voir, toucher, mettre en œuvre les éléments quelquefois les plus opposés, et ne jamais se lasser; si un premier essai a échoué, plusieurs peuvent réussir et compenser largement l'insuccès des premières tentatives.

Dès que le choix d'un mélange a été fixé, on étend sur une aire dallée ou dans des caisses en bois oblongues les diverses matières qui entrent dans sa composition; un ouvrier armé d'une pelle plate en fer, ou mieux en bois, retourne lentement, à diverses reprises, les différentes parties de ce mélange, en allant de la circonférence au centre s'il agit sur une aire, et de bas en haut s'il manipule dans une caisse, de façon à les mêler le plus exactement possible; il humecte la matière graduellement et bien également avec de l'eau froide, ou plutôt chaude. Dès que toute la masse a été ainsi disposée et travaillée, il la remue et la retourne encore, en ayant soin de diviser les parties qui seraient trop agglomérées. Elle forme alors de gros grumeaux, ayant la consistance d'une boue qui commence à se dessécher; on l'égalise bien et on la laisse, quand on le peut, se reposer ainsi quelques heures, souvent même un jour ou deux. A ces manipulations préparatoires, qui doivent être faites avec la plus extrême

propreté, succède enfin le *marchage*, c'est-à-dire le pétrissage au pied. Le marchage est sans aucun doute une des manipulations les plus importantes de toute fabrication de produits réfractaires : on peut dire qu'un mélange vaut d'autant plus qu'il a été plus marché, plus pétri, plus retourné. Il est fâcheux que ce travail se fasse ordinairement avec une trop grande rapidité. La valeur d'un appareil n'a souvent pas d'autre cause.

Une marche, c'est-à-dire un mélange de 1000 à 1200 kil. de matières, y compris l'eau, s'exécute en trois ou quatre heures avec deux ou trois ouvriers. La main appuyée sur un petit bâton, ils marchent sur la terre de droite à gauche, en plaçant le pied sur le bourrelet formé par la pression du pas précédent, de manière à tracer toujours des sillons égaux. Il faut que le second ouvrier recouvre la trace du premier, et le troisième celle du second ; ils continuent ainsi en s'avançant sans précipitation jusqu'au centre ; ils s'éloignent ensuite du centre pour revenir graduellement et avec les mêmes précautions vers la circonférence. Avec l'angle d'une pelle, ils coupent alors en morceaux quadrangulaires cette masse réduite à une épaisseur de $0^m.10$ à $0^m.12$; ils les retournent sens dessus dessous et recouvrent les joints de la première couche par les pleins de la seconde, et ainsi de suite. Ils recommencent à marcher en pressant la terre et répètent plusieurs fois les mêmes manœuvres jusqu'à ce que le mélange prenne une surface lisse, liante sans coller au pied, et d'un grain uniforme et bien homogène. Une pâte bien pétrie, foulée dans la main, la rend humide sans y adhérer : si l'on n'obtient pas cet effet, c'est qu'elle n'est pas suffisamment marchée, ou qu'elle a reçu trop d'eau, et dans ce cas on la laisse se reposer pour la mélanger de nouveau ; on y ajoute aussi quelques parties sèches composées comme le mélange primitif, mais ce moyen est médiocre parce qu'il fausse les qualités de la pâte. On reconnaît qu'une terre est amenée à son point lorsqu'un morceau de pâte roulé en boudin peut être tourné en anneau sans se déchirer ni se crevasser et peut supporter une tension déterminée sans se rompre, ou lorsque, formé en boulette de gros-

seur variable, il s'aplatit sensiblement, c'est-à-dire environ de moitié de son diamètre, sans présenter à ses bords des crevasses, ou bien encore lorsque, brisé, il présente des pointes égales paraissant se rapporter les unes aux autres. Les ouvriers ont une foule de *marques* de ce genre qui les guident avec assez de certitude et qu'il est bon de suivre.

Une autre opération, trop souvent omise, succède au marchage, quand elle ne l'accompagne pas : c'est le *battage*, qui s'opère de la manière suivante :

Lorsque le marchage est à son terme, on divise la terre en rectangles du poids de 5 à 6 kilog. L'ouvrier les saisit et les lance de toute sa hauteur et de toutes ses forces sur le pavé, de façon à les aplatir le plus possible ; mais en lançant les seconds il doit recouvrir les bords des premiers, et ainsi de suite ; il marche ensuite de nouveau pour égaliser et réunir les parties qui n'auraient pas adhéré par le choc et il répète ce travail cinq fois, six fois et même davantage. Souvent on place les terres sur une table assez massive, et, armé de longues battes en bois ou en fer, l'ouvrier les *écharpe* et les frappe à coups redoublés pendant un laps de temps déterminé ; elles sont ensuite replacées sur le carreau ou dans des caisses et marchées comme auparavant.

Le *battage* rend les terres plus compactes ; il expulse l'air qu'elles renferment, et empêche ainsi les *noix* et les boursoufflures qui se manifestent dans diverses pièces après leur confection. On peut se dispenser de ce travail pour les briques ; mais pour les appareils qui exigent un tissu serré, si l'on peut s'exprimer ainsi, qui ne doivent avoir qu'une porosité mécanique, c'est-à-dire celle exigée pour que la dilatation s'opère également, tels que les creusets de distillation, ceux de verrerie, etc., cette opération donne de bons résultats. Au reste, toute manutention qui multiplie le corroyage des pâtes, leur malaxation, tend à les améliorer et à leur donner des caractères de douceur et de souplesse qu'elles ne posséderaient jamais sans cela ; il n'y aurait excès qu'autant que les frais qui en résultent ne seraient plus en

harmonie avec les avantages qui doivent en résulter pour le travail.

Après avoir subi ces diverses préparations, les terres sont mises en *ballons*. Ce ballon est un morceau de pâte rectangulaire, du poids ordinaire de 15 à 20 kilogr., auquel on donne la forme voulue en le pressant fortement sur toutes ses faces par un moyen quelconque, pour l'amener à la plus grande régularité possible, sans qu'il présente de fissures ni de *pailles*; on empile ces ballons dans des lieux humides, en les recouvrant d'une toile mouillée, jusqu'à ce qu'on puisse s'en servir en temps opportun.

On supplée au marchage au moyen de *pétrissoirs mécaniques*. Le pétrissoir est un cylindre vertical, au centre duquel tourne un arbre en fer, armé de lames aciérées disposées en spirale. On prépare les mélanges, comme il a été expliqué précédemment, sur une aire voisine, et on les introduit par l'extrémité supérieure avec la quantité d'eau nécessaire pour former une pâte; on remplit le cylindre au fur et à mesure que les matières descendent; elles sortent à l'extrémité inférieure par deux trous munis de registres à crémaillère, placés à droite et à gauche de l'arbre, et que l'on ouvre ou que l'on resserre à volonté, suivant que la pâte doit être plus malaxée. En sortant, la terre tombe sur une table, où elle est prise par un ouvrier qui la met en ballons, ainsi que nous l'avons exposé précédemment, quand il n'y a pas lieu de la soumettre à un nouveau marchage.

Un cylindre de 1^{m}.70 de hauteur sur 0^{m}.75 de diamètre renferme huit lames; l'arbre fait de trois à quatre tours par minute, et dépense une force de 2.65 à 3 chevaux. On admet que le mélange jeté dans le haut du cylindre met trois à quatre heures pour sortir par l'extrémité inférieure, et que dans une journée de dix heures de travail effectif, la quantité de pâte obtenue s'élève à 7 ou 8,000 kilogrammes. Un pétrisseur est desservi par un chef ouvrier et deux aides : le premier s'occupe du dosage des mélanges et de leur chargement; les seconds sont employés à leur manutention et à enlever les matières ou à les apporter en temps utile.

Ce procédé, plus expéditif et moins coûteux que le marchage, ne

le remplace pas complétement; on n'obtient jamais de la sorte des pâtes aussi homogènes. Il est très convenable pour les briques, qui sont loin d'exiger les mêmes précautions que les autres appareils; aussi se trouve-t-il employé dans les établissements plus particulièrement appropriés à cette spécialité; tels sont ceux d'Audenac (Belgique), de Cowen et de Rancy, en Angleterre, dont les produits se trouvent sur tous les points. Comme agent préparatoire, on ne saurait, en aucun cas, en contester l'utilité.

Toutes les fois qu'on le pourra, il faudra mettre en *caves* les pâtes obtenues, n'importe par quel système, et les y laisser séjourner plusieurs mois pour les *pourrir*.

Quelles sont les réactions opérées par le pourrissage? On l'ignore à peu près, ou l'on prétend qu'il se développe une sorte de fermentation due à la décomposition de certaines matières organiques, bitumineuses, que les argiles renferment plus ou moins. Ce qu'il y a de certain, c'est que les pâtes éprouvent par le fait du pourrissage des qualités incontestables, et que leurs produits sont bien meilleurs. Ainsi des pâtes rudes, âpres, chargées de ciments, après quelque temps de séjour dans les caves, acquièrent une souplesse et une onctuosité impossibles à obtenir auparavant. Pour mon compte, je considère le *pourrissage*, tous autres soins observés d'ailleurs, comme le complément nécessaire de la préparation des terres. C'est une pratique suivie dans les faïenceries principalement, et que j'ai vue adoptée dans plusieurs verreries, et je pense que divers établissements y puisent leur principal succès. Le plus petit potier est convaincu des effets du pourrissage, et il l'utilise lorsque c'est en son pouvoir.

Telles sont les conditions à résoudre dans la fabrication des diverses sortes de produits réfractaires : quand on n'y satisfait pas, il est difficile d'obtenir des résultats avantageux. Il nous reste à indiquer quelques détails d'application, suivant les formes à donner et les moyens en usage pour les exécuter.

Pour ce qui concerne les briques, il suffit de remplir des modèles appropriés à leurs diverses destinations, en ayant soin de les masser

fortement sans laisser de joints en rapportant la pâte : elles doivent être denses et aussi compactes que possible, avec des angles bien arrêtés. Dans les usines où cette fabrication est établie sur une grande échelle, on a souvent recours à des machines fort ingénieuses, parmi lesquelles nous citerons celles de Lyne et Stainford, de Edward Jones, en Angleterre, et particulièrement celle de M. *Térasson*, en France, qui leur est supérieure, et dont on trouve une description très claire dans la direction des arts et manufactures (1845). Nous ferons observer toutefois que ces machines sont bien plutôt destinées aux briques communes qu'aux briques réfractaires, qui ont des formes plus variées et moins usitées.

Quant aux creusets et aux appareils de distillation, d'après les différentes formes qu'on veut leur donner, et les emplois auxquels ils sont destinés, on emploie le tour à potier; ou bien on comprime la pâte dans des matrices en bois, en fonte ou en bronze; on la modèle aussi sur des mandrins en la frappant intérieurement ou extérieurement (d'après leurs dispositions) avec des battoirs ou des maillets en fer convenablement appropriés; on façonne encore des *colombins* qu'on dispose à la main en anneaux successifs, reliés les uns aux autres sans solution de continuité; d'autres fois on évide sur le tour des blocs à moitié desséchés avec des instruments ad hoc, ou l'on façonne les appareils en pelant la pâte dans un moule formé d'un cylindre creux dont l'axe est rempli par un cylindre plein ayant un diamètre égal au diamètre intérieur du creuset; enfin, dans d'autres cas, pour les tubes et les cornues, on procède par le *coulage*, comme cela se pratique dans la fabrication des porcelaines pour certaines pièces.

L'emploi de ces procédés est en général du fait des ouvriers, et exigerait des détails qui ne rentrent pas dans cet aperçu. La fabrication des pots de verreries et d'aciéries, des cornues à gaz, des creusets ou des mouffles pour le traitement des minerais de zinc, diffère en ce qui regarde les moyens et les engins employés; cependant il y a plusieurs points de contact et de ressemblance dans

l'exécution. C'est en étudiant les différentes industries qu'on y trouvera les enseignements nécessaires.

Ce qui importe par dessus tout et ce qui est commun à tous les produits, c'est d'obtenir dans les appareils des parois d'épaisseur constante, très nettes, exemptes d'aspérités, de vides, de soufflures, bien lisses; en un mot il faut éviter toutes les causes qui peuvent nuire à l'uniformité du tissu et à sa dilatation régulière.

Quelques industriels font subir, soit aux briques, soit aux creusets, lorsqu'ils commencent à durcir, un frappage énergique en prenant les précautions nécessaires : cette opération, exécutée avec soin, renoue le tissu, le rend plus résistant, sert à expulser l'air et donne de très bons résultats.

§ V. — Du séchage.

Toutes les précautions et tous les soins que nous avons indiqués deviendraient presque inutiles si l'on ne donnait à la dessiccation des produits toute l'attention qui constitue tout le mérite et tout le succès de la fabrication.

Il n'est guère de fabricant d'appareils réfractaires qui ne prétende avoir un secret particulier pour rendre ses produits supérieurs à tous les autres. A part la nature spéciale des argiles, telles que celles de Parsau et de Gros-Almerade, et la composition des pâtes qui s'adapte aux matières à traiter, ce prétendu secret ne repose que sur les soins minutieux consacrés à l'accomplissement des conditions que nous avons passées en revue. Il y a tel établissement que je pourrais citer qui ne doit son insuccès et la grande dépense qu'il supporte de ce chef qu'à la négligence apportée dans la préparation de ses pâtes, dans leur mise en œuvre, ainsi que dans leur séchage.

Les pièces fabriquées doivent, quelle qu'en soit l'espèce, subir une dessiccation graduée, lente, très lente même et long-temps prolongée, pour qu'elles se contractent également et uniformément, sans se gercer ni se déformer. Le séchage devrait commencer à l'air libre,

dans des ateliers d'une température constante : à ce titre les produits obtenus en été seront toujours préférables. Mais lorsque (et c'est le cas le plus ordinaire dans nos climats), le temps et la saison y mettent obstacle, on doit d'abord les placer dans des séchoirs chauffés de 15 à 18°, pendant 25 à 30 jours, et ventilés modérément. Il vaudrait mieux les laisser, si l'on dispose d'espaces suffisants et convenables, se ressuyer là où ils ont été élaborés, et ne les sortir, pour les placer dans les étuves, qu'après qu'ils sont assez affermis pour ne plus redouter les mouvements et les chocs.

Quand d'une façon ou de l'autre les terres ont subi ce séchage préparatoire, on les transporte dans des séchoirs chauffés depuis 25° jusqu'à 35°, et on les y fait séjourner le plus possible. Il ne faut pas perdre de vue que les ateliers de séchage doivent réunir à une température constante une ventilation active, avec une grande facilité d'échappement pour les gaz et les vapeurs. On ne doit pas mêler des appareils nouveaux avec d'autres plus anciens, parce que ces derniers absorberaient l'humidité dégagée par les derniers venus. Enfin, avant de passer à la cuisson, les pièces fabriquées doivent encore passer, pendant un mois, six semaines, dans des pièces chauffées à la température de 50 à 60°, et plus si c'est possible. Les briques ne réclament pas des soins si minutieux, mais plus une cornue, un creuset, a suivi ces conditions, plus il a acquis d'âge, plus les chances de résistance et de durée sont grandes. Ainsi, soit une composition excellente d'ailleurs, qui fournira, je suppose, cent creusets, dont la moitié sera employée au bout de soixante à quatre-vingt jours, et dont l'autre moitié le sera seulement après six ou huit mois, on obtiendra les résultats suivants :

Les creusets, âgés de deux mois à deux mois et demi, auront disparu après dix à douze jours de service ; ils périront en grande partie dès les premiers jours de leur mise au four, tandis que ceux datant de cinq à six mois supporteront plus long-temps les premiers coups de feu, résisteront, en moyenne, de vingt-cinq à trente jours, et souvent davantage.

Donc, plus un creuset remonte à une fabrication ancienne, plus il est desséché, mieux il vaut. C'est un fait constant que démontre l'expérience de tous les jours, même avec des terres médiocres. On n'observe guère cette formalité que dans les verreries, soit parce qu'on en a pris l'habitude, soit parce qu'elle a des conséquences très importantes. Toutes les usines à zinc, des divers systèmes, pèchent par l'insuffisance d'âge et de dessiccation.

La dessiccation des appareils réfractaires est ce qu'il y a de plus négligé partout.

Voici ce qui se passe le plus communément. D'abord on fabrique très vite, sauf à masquer après coup les inégalités et les *fils* (gerçures) avec une pâte très liquide: il s'ensuit que les parois du vase raccordé contiennent un excès d'eau sur les points mastiqués; on dessèche ensuite autour des poêles, par conséquent d'une manière rapide et inégale, puisque la chaleur n'arrive que sur un côté : le retrait s'opère de telle sorte que la pièce se courbe en arc de cercle, des gerçures et des fissures se déclarent sans qu'on puisse y remédier, quoiqu'on ait le soin de présenter successivement toutes les faces au rayonnement du calorique. Des creusets ainsi obtenus se brisent ou se fondent à une simple cuisson.

Si l'on évite cet inconvénient, on se hâte de déposer les creusets encore humides dans des séchoirs sans aération et chauffés à 28 ou 30°; ils sèchent extérieurement avec assez de rapidité; la croûte se durcit et ne laisse plus évaporer l'humidité, cause de rupture inévitable quand on les emploie.

On tombe aussi dans un autre inconvénient, qui n'est pas moins fréquent, et qui dépend de la mauvaise disposition et de l'insuffisance des ateliers de séchage, ou de toute autre cause. Il consiste à porter des pièces qui sortent des ateliers de modelage, quand elles sont à peine ressuyées, au milieu de celles qui sont plus avancées. Il suit de cette inconséquence, que l'eau vaporisée par les dernières est absorbée par les premières, et ainsi de suite indéfiniment. En voulant bien réfléchir qu'un creuset dans le genre de ceux em-

ployés au traitement du zinc renferme encore de l'humidité après un séjour de trois mois à l'étuve, on comprendra que tout l'avantage de la dessiccation est perdu quand un atelier n'est pas complétement dégarni avant d'introduire de nouveaux produits. Il est donc essentiel d'avoir des lieux tellement agencés, que les produits d'une époque se trouvent toujours séparés de ceux provenant d'une date plus récente.

Les dispositions généralement vicieuses des séchoirs, le défaut de ventilation et l'insuffisance de dégagement pour les vapeurs humides, sont des causes qui nuisent d'une manière fâcheuse à la sûreté et à la durée du séchage ; on reste dans le doute le plus vague sur l'issue de cette opération ; on ne l'apprécie qu'aux causes presque désastreuses qui, dans certains moments, viennent entraver les travaux et les ralentir.

Nous avons insisté sur ces difficultés en vue de la réduction des minerais de zinc et des applications de ce métal, qui a pris depuis quelques années tant d'extension, extension qui tend à s'accroître bien plus encore par sa conversion en *blanc* ou *oxyde de zinc*, fabrication qui elle-même doit recourir, comme son générateur, aux produits réfractaires.

Ce serait sans doute le lieu de tracer les principes et les divers modes de chauffage, de ventilation et d'aérage à employer dans les séchoirs ou étuves ; mais ce travail exigerait des développements qui nous entraîneraient trop loin, et il a été d'ailleurs tracé par divers auteurs, entre autres Pechet et Grouvelle, et il fait le sujet d'une notice spéciale dans les études que nous sommes occupé à rédiger sur le traitement des minerais de zinc, de façon à éviter toute école douteuse et à obtenir de bons résultats. Ainsi que je l'ai déjà exprimé, c'est encore dans les verreries qu'on pourra trouver les applications et les exemples les plus fructueux dans le séchage des produits réfractaires. Les gaz et les chaleurs perdus, que beaucoup d'usines laissent s'égarer, peuvent et doivent être utilisés pour ce travail, et permettent ainsi de réaliser des économies très importantes.

Le mode d'emploi ne peut être déterminé que par la nature même des gaz et les dispositions locales.

C'est par cette longue série d'opérations et de soins qu'on parvient à donner aux diverses sortes d'appareils réfractaires les qualités suivantes : *infusibilité*, *facilité de passage aux changements de température* sans se fracturer ni se fêler, *imperméabilité* aux gaz, aux liquides, impossibilité de *donner prise* aux matières en fusion qu'ils contiennent, et résistance à l'action corrosive des combustibles plus ou moins purs.

Il est rare, pour ne pas dire impossible, que toutes ces qualités puissent se trouver réunies; aussi ne cherche-t-on à obtenir que celles qui favorisent le travail auquel les appareils sont destinés; mais tous doivent, comme condition première, résumer l'*infusibilité*. Comme nous l'avons exposé, ce sont les *ciments* qui en forment l'élément capital.

Nous terminerons ces observations, qui ne peuvent résumer que des données générales, nécessairement variables avec les éléments que l'on possède, les localités et les travaux particuliers de chaque usine, par un court exposé sur les argiles les plus connues et leurs compositions. Nous y joindrons les mélanges de pâtes que l'usage et quelques uns de nos essais nous ont fait connaître comme étant les plus favorables. Nous finirons par quelques mots sur les fours usités dans la cuisson des briques, des creusets et des ciments, en présentant les croquis de ceux qui nous ont paru réunir les meilleures conditions.

Dans son *Traité des Essais*, qu'*il est bon de consulter*, M. Berthier a donné une foule d'analyses utiles à étudier. Celles que nous transcrivons ici viennent de différentes sources; on peut les adopter avec confiance, sans cependant les envisager autrement que nous ne l'avons conseillé: ce sont simplement des indications.

Les argiles ou *terres* d'Audenac (Belgique), comme on les nomme indifféremment dans la province de Namur, reçoivent ce nom du village où elles sont entreposées et ensuite expédiées au dehors. Les

principales sont celles de *Tahier*, *Maizerouille*, *Mozet*, *Haltinne*, *Lyonnet*, etc., etc.; elles gisent dans un bassin formé, d'un côté, par le calcaire anthracifère, et de l'autre le terrain houiller, courant de l'est à l'ouest dans des espèces de poches creusées dans le calcaire.

Voici leur composition générale :

Silice combinée. . . .	53	et	52 d'après Berthier.
» libre.	5		»
Alumine.	29.32		27
Fer	0.61		2
Chaux	traces.		traces.
Eau	13		19
	100,93		100

D'après M. Coste, ancien préparateur à l'École des Mines, à qui je les dois, voici les analyses des argiles suivantes :

	Tahier.	Maizerouille.	Mozet.	Haltinne.
Silice combinée . .	56	46	52	40
» libre. . . .	2	10	9	18
Alumine	26	33	25	25
Magnésie.	2	»	traces.	1.60
Eau	14	18	12	15
Fer.	»	»	»	0.44
	100	108	98	100.04

Variété dite Crawe, de Mizerouille, première couche qui recouvre les bancs inférieurs, ordinairement employée dans les briques réfractaires de dernière qualité.

Silice.	51
Alumine. . . .	27
Oxyde de fer. . .	7
Eau	14
Magnésie. . . .	traces.
	99

Terre de Lyonnet, analysée à la verrerie de Sainte-Marie-d'Oc-ginis :

Silice combinée. . .	56
» libre. . . .	7
Alumine.	24
Magnésie.	0.51
Oxyde de fer. . . .	0.50
Eau	11.28
	99.29

On vante beaucoup celle de Tahier; je préfère celles de Maizerouille et de Lyonnet : la première est très noire et a un liant que ne possèdent pas les deux autres.

En France, nous avons, entre autres, les argiles de Forges, Abondant, Montereau, Gournay, Gisors, Savigny, Condé, Montcenis, Montluçon, etc.

En Angleterre on cite les terres plastiques de Schropshire, Stourbridge, Stannington, et celle si connue du Devonshire.

En Allemagne, Passau, Sneeberg en Saxe, Memmingen en Saxe, Gross Almeraden dans la Hesse, les terres de Bohême, de Lingesiau, celles de Berne en Suisse, etc., etc.

Il suffira de connaître simplement les proportions de silice et d'alumine.

	Silice.	Alumine.
Forges	65	24
Abondant.	52	40
Montereau (Yonne).	64	24
Montcenis (Saône-et-Loire).	55	45
Gournay id.	53	31
Id.	32	78
Devonshire	49	37
Stannington	38	40
Stourbridge	46	42
Schropshire	70	19

Passau. —	Silice.	41
	Alumine.	14
	Oxyde de fer . . .	18
	Charbon.	34
		107

	Silice.	Alumine.
Schneeberg	43	37
Memmingen	34	27
Bohême	68	29
Gross Almeraden.	48	34
Valendar.	66	24
Saint-Etienne	65	25
Leyval (Charente-Inférieure)	52	31

Il serait inutile de prolonger davantage cette nomenclature, qui a pour but de faire voir l'extrême diversité des principes des argiles réfractaires et la réserve qu'il faut observer avant de les appliquer à tel ou tel usage. En effet, quoique presque identiques par la composition, les terres de Forges, Montereau, Valendar, Saint-Etienne, ne sont pas également infusibles, et il ne faut pas croire que ce soit dû à la présence de l'oxyde de fer, car celle de Saint-Etienne, qui en renferme de sept à huit centièmes, est infiniment supérieure à celle de Valendar, qui en contient de un à un et demi. Ces anomalies disparaissent presque toujours en associant ces terres les unes aux autres. La terre d'Abondant seule, recherchée généralement pour les gazettes de nos faïenceries, donne des creusets de laboratoire quand on y ajoute quelques parties d'argile des pays d'Ardennes, et alors on obtient des résultats de qualité égale aux plus réputés de Hesse.

Parmi les compositions de pâtes formées par quelques unes de ces argiles, en voici qui s'appuient sur des expériences réitérées et consacrées par la pratique :

Briques: N. 1.	Débris de briques. . .	6	
	Quartz	2	
	Haltinne calciné. . .	4	
	Sable blanc	1	
		13	13
	Argile Maizerouille crue.		9
			22

Elles contiennent 12 parties d'eau.

N. 2.	Débris de briques . .	6	
	Vézin (près Lyonnet). .	3	
	Ciment de Gazettes . .	1	
	Quartz	3	
	Cock	» 50	
		13 50	13 50
	Argile Maizerouille crue.		8 50
			22 »

Elles contiennent 11 parties d'eau.

N. 3.	Débris.	4	
	Argile calcinée. . . .	2	
	Sable	2	
		8	8
	Tahier crue.		3
			11

Contient 9 parties d'eau.

N. 4.	Vieilles gazettes. . .	60	
	Sable	5	
	Argile crue	35	
		100	100

N. 5.	Terre cuite.	4	
	Débris	3	
	Cock	1	
		8	8
	Argile crue		3 50
			12 »
N. 6.	Débris.	2	
	Ciments divers. . . .	3	
		5	5
	Argile crue		2
			7

Ces exemples suffisent. Avec d'autres terres on peut adopter pour base des compositions deux tiers ou trois cinquièmes de divers ciments que l'on possède. Ce sont, à peu de choses près, les proportions qui sont en usage dans les fabriques de Belgique et d'Angleterre. Dans nos pays, pour les briques dites de Bourgogne, la dose d'argile est peut-être trop grande. — Les briques numéros 2, 3 et 5, pour foyers, sont très résistantes.

Les exemples suivants, qui donnent des creusets pour la réduction des minerais de zinc et des pots de verrerie, se rapprochent beaucoup de ceux qui précèdent.

N. 1.	Ciments: Débris.	10	
	Quartz.	2	
	Haltinne cuite . . .	8	
		20	20
	Alliage : Maizerouille, crue.		11
			31

Contient 15 parties d'eau.

N. 2. Même proportion de ciments, avec 2 de cock et 11 de terres de Tahier.

Terre de Lyonnet.

N. 3. Ciment : Débris.	70		
Terre cuite	100		
	170	170	
Alliage : Terre crue.		100	
		270	
N. 4. Ciment : Débris.	26		
Terre cuite.	20		
	46	46	
Alliage : Terre crue.	12		
Lyonnet	32		
	44	44	
		90	
N. 5. Ciments : Débris	10		
Quartz.	8		
Cock	2		
	20	20	
Alliage : Terre de Passau. . .	8		
Memmingen	4		
	12	12	
		32	

Contient 9 parties d'eau.

Argile Tahier.

N. 6. Ciments:	Tahier calciné. . . .	10	
	Débris.	8	
	Quartz.	1	
	Cock	0 50	
		19 50	19 50
Alliage:	Argile crue.		10 50
			30

Elle donne des creusets de très bonne qualité pour la réduction du zinc.

Le N. 5 est une composition très bonne pour les briques de foyers, pour les creusets, les pots de verrerie; elle est employée dans diverses verreries de la frontière E. de Bavière, et dans les mines de zinc de Gatinetz, de Dibernier et d'Achenrhien (Tyrol).

N. 7. Ciments:	Débris.	4	
	Vieilles gazettes . . .	4	
	Graphite.	0 50	
		8 50	8 50
Alliage:	Terre Schneeberg. . .	2	
	Argile du pays. . . .	1 50	
		3 50	3 50
			12 »

Mêmes observations que pour le n° 5.

N. 8. Ciments:	Débris.	6	
	Terre cuite.	4	
	Cock	0 50	
		10 50	10 50
Alliage:	Terre crue.		4 »
			14 50

Malgré diverses tentatives, nous avons observé que, lorsque le cock dépasse la proportion de un dixième, ses avantages sont assez

incertains. Il supplée au graphite, qui, malheureusement, n'est pas très commun, et est fort cher ; c'est un des éléments les plus efficaces des produits réfractaires : au delà de deux à trois pour cent de la proportion des ciments, il leur enlève, dans certains cas, de la résistance mécanique, et les produits se brisent sous leur propre poids. Ces deux agents sont souvent préférables aux Quartz, qui, sous des températures élevées, tendant à se combiner avec les argiles nouvelles, amènent le ramollissement des appareils. On peut les employer lorsque les appareils doivent reposer sur une sole, ou ne sont pas par eux-mêmes d'un trop grand poids.

Une argile d'un gris sale, provenant de la décomposition de roches porphyriques, renfermant, d'après l'analyse, 46 de silice et 39 d'alumine avec des traces de fer, et d'après un essai fait à Sèvres par les soins de M. Brongniart, où elle avait été reconnue comme très réfractaire, n'a donné des appareils que très peu résistants ; en outre, presque tous éclataient au premier coup de feu. Nous avons remédié à cet inconvénient par une addition de Dolomie.

Ainsi que je l'ai dit en commençant, elles peuvent, quand elles sont alliées à cet élément, devenir d'un usage très avantageux. — Ainsi j'ai obtenu avec les crawis de Belgique d'excellents creusets pour le traitement du zinc, nonobstant la présence du fer.

Ciment.	Sable arg. d'Ampien. . .		6	
	— blanc d'Andennes. .		2	
	Crawis calcinée		2	
	Débris de creusets . . .		4	
				14
Alliage.	Terre de Tahier. . .	3		
	Crawe	4		
		7		
				21

Telle pâte qui donnera des creusets excellents quand ils sont de petites dimensions ne donnera plus que des appareils médiocres dès qu'ils atteignent une capacité plus considérable et qu'ils offrent plus de surface.

Des appareils qui, en se desséchant, ou sous l'impression d'autres

influences, se fêlent dans le sens longitidunal, dénotent un excès de matières sèches ou de ciment; si la cassure se déclare dans le sens latéral, c'est qu'il y a surabondance de terre d'alliage ou d'argile nouvelle.

Ces deux particularités sont produites par les mêmes causes; on y remédie en diminuant la substance dominante ou en prenant des ciments à grains plus gros.

§ VI. *Des fours.*

Les fours employés pour la cuisson des briques ou des creusets sont à peu près semblables à ceux qui servent à la cuisson des poteries et des porcelaines : il suffirait donc de s'en servir si l'on avait le soin d'observer les mêmes précautions; mais c'est ce qui n'a pas généralement lieu. On emploie alors des appareils de dimensions généralement plus restreintes, d'une construction plus simple et d'une conduite plus facile. Dans certaines usines, on utilise les flammes perdues des fourneaux, qu'on dirige dans des fours établis tantôt au gueulard des hauts-fourneaux, tantôt dans l'entre-deux des fours silésiens, au centre du massif, tantôt à la sortie du gaz, au sommet des fours belges, quelquefois dans des fours rectangulaires ou ronds, terminés par un dôme percé au centre. On dispose alors un ou plusieurs carnaux se réunissant dans un conduit commun. Les flammes peuvent encore être dirigées dans des fours circulaires à flammes renversées ou dans des fours à réverbère de dispositions particulières.

Nous nous bornerons à donner les croquis de quelques uns de ces fours (Planche 26.) que nous avons expérimentés sur différents points, en attirant l'attention sur un four à flammes renversées que nous avons fait construire à Liége (Belgique), et qui, indépendamment d'une cuisson plus prompte et plus égale, réalise sur tous les autres une économie de combustible de près de 40 p. 100.

Les creusets et les briques doivent se placer dans les fours dans le sens longitudinal ou vertical, et être disposés de manière à ce que les gaz soient également répartis dans tous les points du four. L'enfournage est une opération qui a une certaine importance et qu'il ne faut pas faire arbitrairement, en couchant les vases sur le flanc, ou en

mettant les briques à plat, au risque de produire de nombreuses fêlures.

Il faut procéder à la mise en feu d'un four avec de grands ménagements; quelquefois on commence à faire un petit feu dans le cendrier; on le reporte ensuite sur les grilles, et on l'augmente lentement et graduellement, pour ne l'activer que lorsqu'on suppose que toute la masse est également échauffée, ce qui n'a guère lieu qu'au bout de 8 à 10 heures. Dès que le feu a été plus vigoureusement poussé, on doit l'entretenir à ce degré sans intermittences. Suivant la nature et les dimensions des pièces, la cuisson dure 24, 36, et même 60 heures. — Pour calciner les terres, on ne met guère moins de 60 heures; il est toujours préférable de prolonger ce terme, quand on ne craint pas le ramollissement et le vernissage des parties les plus en contact avec la sole.

Lorsque la cuisson est terminée, il faut que le refroidissement s'opère lentement, et que l'air extérieur ne s'introduise pas dans le four; il convient donc de boucher toutes les ouvertures, même celle du conduit.

Quand on doit employer immédiatement les creusets, comme dans le traitement des minerais de zinc, ou dans la fabrication du verre, on doit les empêcher de se refroidir d'une manière trop rapide, jusqu'à leur introduction dans le four; et même, chaque fois qu'on en retire du four de cuisson, on ferme les portes et l'on continue à y entretenir le feu. Mais lorsque les appareils sont dans de bonnes conditions, le passage à l'air, même à de certaines distances, s'effectue sans accident.

MÉMOIRES

ET

COMPTE-RENDU DES TRAVAUX

DE LA

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

(Octobre, Novembre et Décembre 1852)

N° 19

Pendant ce trimestre on a traité les questions suivantes :

1° Résistance à la traction des wagons à freins (Voir le résumé des séances, pages 193 à 204);

2° Emploi des plateaux-coussinets en fonte substitués aux traverses et coussinets ordinaires employés dans la construction des voies de fer (Voir le résumé des séances, page 204);

3° Discussion du mémoire de M. Love sur la résistance du fer et de la fonte (Voir le résumé des séances, pages 205 à 221);

4° Discussion du mémoire de M. Girard sur les chemins de fer hydrauliques (Voir le résumé des séances, pages 221 à 229 et 234 à 239);

5° Entretien de la voie du système Pouillet (Voir le résumé des séances, pages 131 à 133);

6° Communication d'un mémoire de M. Robert Rawilnson sur le drainage des villes (V. le résumé des séances, pages 243 à 249);

7° Révisions des statuts (Voir le résumé des séances, pages 250 à 253);

8° Situation financière de la Société (V. le résumé des séances, pages 255).

Dans la séance du 17 décembre, la Société a procédé aux élections des membres du bureau et du comité pour l'année suivante. Le résultat du scrutin a donné la composition suivante :

BUREAU.

Président :

M. Petiet (J.) ✻✻.

Vice présidents :

MM. Vuigner (Emile) O ✻.
Callon (Charles).
Flachat (Eugène) ✻✻.
Polonceau (C.) ✻.

Secrétaires :

MM. Bellier (Adolphe).
Mathieu (Henri).
Lorentz (E.).
Yvert (Léon).

Trésorier :

M. Loustau (G.)

COMITÉ.

MM. Yvon-Villarceau.
Degousée.
Faure.
Houel ✻.
Nozo (Alf.).
Salvetat.
Barrault (Alexis).
Alcan (M.).
Cavé ✻.
Bergeron.
Séguin (Paul).
Thomas (Léonce) ✻.
Calla ✻.
Chobrzinsky.
Bois (Victor).
Mony (Stéphane) ✻.
Knab.
La Salle.
Pépin-Lehalleur.
Evrard.

Président honoraire : M. A. Perdonnet ✻.

Pendant ce trimestre la Société a reçu :

1° De M. Jules Guibal, membre de la Société, un exemplaire d'un projet d'une nouvelle distribution d'eau de 300 pouces pour la ville de Toulouse.

2° De M. C.-E. Jullien, membre de la Société, un exemplaire de son ouvrage intitulé : Les carbures de fer et en général les fers impurs sont des dissolutions.

3° De M. Jules Poirée, ingénieur des ponts et chaussées, une note supplémentaire de ses expériences sur la traction des trains.

4° De M. Girard, membre de la Société, un mémoire intitulé : Nouveau système de locomotion hydraulique appliqué sur les chemins de fer.

5° De M. Chavès, membre de la Société, une note sur des calculs sur la résistance des rails.

6° De M. de Fontenay, membre de la Société, une note sur l'action chimique exercée par un certain nombre d'huiles du commerce sur les métaux, et en particulier sur le cuivre.

7° De M. Le Chatelier, ingénieur en chef des mines, un exemplaire de sa notice sur le sondage à la corde.

8° De M. Phillips, ingénieur des mines, un exemplaire de son Manuel pratique pour l'étude et le calcul des ressorts en acier employés dans le matériel des chemins de fer.

9° De M. Ebray, membre de la Société, une note sur une nouvelle machine à essayer le fer, et une note sur l'analyse des mouvements dans les machines et la comparaison de ces mouvements avec les mouvements naturels.

10° De M. Goschler, membre de la Société, une note sur la désargentation du plomb par le zinc métallique.

11° De M. Deniel, membre de la Société, une notice sur un tachomètre, destiné à servir d'indicateur de la marche aux conducteurs de locomotives, et à tirer les diagrammes de la vitesse.

12° De M. Henri Chavandret, un mémoire sur la conduite générale et l'entretien d'une machine locomotive.

13° De M. Ebray, membre de la Société, une note sur la machine fixe à grande vitesse de M. Flaud.

14° De MM. Callon et Girard, membres de la Société, un exemplaire d'un mémoire sur les turbines hydro-pneumatiques.

15° De M. Jules Gaudry, membre de la Société, un mémoire sur la navigation des bateaux à vapeur.

16° De M. le général Poncelet, un exemplaire de son examen

historique et critique des principales théories concernant l'équilibre des voûtes.

17° De la Société industrielle de Mulhouse, un exemplaire de son dernier Bulletin.

18° De M. Volland, membre de la Société, une notice sur la construction du pont de Ponthion.

Les membres nouvellement admis sont les suivants, savoir :

Au mois d'octobre :

MM. Crosnier, présenté par MM. Eug. Flachat, L. Yvert et Moreau.

Germain, présenté par MM. Petitgand, Huet et Geyler.

Barberot, présenté par MM. Eug. Flachat, Félix Tourneux et Lorentz.

Courtines, présenté par MM. Eug. Flachat, Barrault et Lorentz.

Richoux, présenté par MM. Eug. Flachat, Faure et Yvert.

Saint-James, présenté par MM. Vuigner, Yvert et Lepeudry.

Deniel, présenté par MM. Eug. Flachat, Félix Tourneux et Victor Bois.

Froyer, présenté par MM. Eug. Flachat, Lorentz et Barrault.

Buddicom, présenté par MM. Eug. Flachat, J. Petiet. et Edwards.

Decaux, présenté par MM. Championnière, Lorentz et Limet.

Leloup, présenté par MM. Huet, Geyler et Blanche.

Devers, présenté par MM. Huet, Geyler et Blanche.

Souchay, présenté par MM. Barrault, Lorentz et Romme

Au mois de décembre :

MM. Thouin, présenté par MM. J. Petiet, G. Loustau et Nozo.

Bonnet, présenté par MM. A. Barrault, Lorentz et Alquié.

Leuba, présenté par MM. Eug. Flachat, G. Loustau et Love.

Jacquesson Ernest, présenté par MM. E. Vuigner, G. Loustau et Faure.

Résumé des travaux de chaque séance pendant l'année 1851 (1).

SÉANCE DU 21 FÉVRIER 1851.

Présidence de M. Auguste Perdonnet.

Le président annonce à la Société que le *Journal des Chemins de fer* est chargé de reproduire, après chaque séance, le résumé des discussions. C'est un moyen de faire participer les membres qui habitent les départements aux travaux de la Société.

M. Thomas (Léonce) remet au président un numéro du *Moniteur industriel* du 16 février, qui a reproduit, d'après le *Journal des Chemins de fer*, sans en indiquer la source, deux notes lues dans la dernière séance de la Société. Il demande que le journal soit invité à indiquer à l'avenir l'origine des mémoires qu'il empruntera au compte-rendu des séances de la Société.

Le président répond qu'il sera fait droit à cette demande.

On passe ensuite à la discussion sur les ponts suspendus.

Le rapporteur, M. Vuigner, résume successivement les divers paragraphes du rapport de la commission chargée de rechercher les causes de la chute du pont suspendu de la Basse-Chaîne, à Angers.

M. Vuigner rappelle que la chute du pont d'Angers a ramené de nouveau l'attention publique sur les ponts suspendus, et l'administration supérieure s'est empressée de nommer une commission prise exclusivement dans le corps des ponts et chaussées et des mines pour étudier toutes les questions relatives à ce système de construction.

La *Société des Ingénieurs civils*, qui compte au nombre de ses membres des ingénieurs qui se sont occupés plus particulièrement de ces ouvrages d'art, et qui ont en conséquence le plus de pratique pour leur exécution, ne pouvait pas rester étrangère aux discussions de cette nature. Nous avons examiné toutes les questions qui se rattachent à l'établissement comme à l'entretien des ponts suspendus, et nous avons recherché les causes probables de la chute du pont d'Angers; nous venons vous présenter le résultat de nos recherches et de nos observations.

Nous avons pensé qu'il était utile d'abord d'effleurer la question commerciale, ou, pour mieux dire, d'esquisser à longs traits l'historique des ponts suspendus, en indiquant le service que l'industrie privée a rendu au pays en propageant ce système de ponts; qu'il y avait lieu, ensuite, d'étudier les questions techniques, mais seulement sous le rapport pratique, puis d'en déduire les causes de la chute du pont d'Angers, et, enfin, de parler de la

(1) A l'avenir le dernier Bulletin de chaque année contiendra la réimpression des résumés de chaque séance, afin de permettre aux nouveaux membres de consulter les travaux de la Société.

réglementation relative à la construction des ponts suspendus, à leur entretien et à leur exploitation.

Tel est l'ordre que nous suivrons.

HISTORIQUE, QUESTION COMMERCIALE.

Il faudrait remonter très haut pour indiquer l'origine des ponts suspendus ; bornons-nous à dire qu'on la trouve dans les ponts de corde des Cordillères, comme dans les ponts de chaînes de la Chine ou du Thibet; que dans les guerres d'Italie, au moyen âge, les Suisses se servaient de ponts suspendus avec des cordes pour passer les torrents, et qu'un grand nombre de ponts supportés par des chaînes ont été construits depuis près de soixante ans dans les États-Unis de l'Amérique septentrionale.

L'application du principe de la suspension à la construction des ponts avait appelé l'attention des ingénieurs anglais dès 1810, et Telfort présenta, en 1813, le projet d'un très grand pont de ce genre à établir sur la Mersey, près Liverpool. Le même ingénieur rédigea un autre projet, en 1818, pour la construction d'un pont suspendu sur le bras de mer qui sépare l'Angleterre de l'île d'Anglesey ; mais les travaux de ce pont, commencés en 1820, n'ont guère été achevés qu'en 1824.

Le capitaine Brown est le premier qui ait construit en Angleterre un pont suspendu destiné à donner passage aux voitures. Cet ouvrage, situé sur le Twed, près du pont de Berwick, a été livré au public le 26 juillet 1820.

Peu de temps après, un ingénieur français, M. Brunel, qui avait été porter en Angleterre le fruit de ses études et de son imagination brillante, fit exécuter deux ponts suspendus, qui furent transportés à l'île Bourbon, pour donner passage à des voitures légères sur des cours d'eau qu'il y avait à franchir dans cette localité.

Depuis lors, un très grand nombre de ponts suspendus ont été construits en Angleterre, ainsi qu'en Écosse et en Irlande.

En France, un ingénieur des ponts et chaussées, M. Bélu, présenta, en 1807, le projet d'une arche suspendue, de 250 mètres d'ouverture, destinée à franchir l'un des bras du Rhin, entre Wesel et Rudrig ; mais ce projet ne fut pas mis a exécution.

MM. Seguin firent, en 1823, un essai qui réussit parfaitement, et, le 22 janvier 1824, ils obtinrent les premiers, en France, la concession d'un pont supendu en fil de fer, qui fut construit sur le Rhône, entre les villes de Taice et de Tournon.

Une autre concession de pont suspendu en fer forgé fut donnée, le 10 mai 1824, à une compagnie qui l'établit sur la Seine, à Paris, en face des Invalides.

En rendant compte, en 1823, des études qu'il avait faites en Angleterre sur la construction des ponts suspendus, Navier disait à M. le directeur général des ponts et chaussées que la construction de ces nouveaux ouvrages offrait un champ nouveau à l'art de l'ingénieur ; que, par l'emploi du principe de la suspension, cet art acquérait en effet des procédés plus économiques, plus faciles et plus étendus, pour l'établissement de nouvelles voies de communication ; que l'usage des constructions en chaînes de fer, en donnant les moyens d'établir à peu de frais des ponts solides et durables, ap-

porterait de nouvelles facilités pour exécuter ces ouvrages avec des fonds fournis par des compagnies et remboursés par des péages à terme, et qu'en conséquence, l'adoption de ces nouvelles constructions tendrait à favoriser l'application aux travaux publics du principe de l'association, élément important et fécond de la prospérité nationale.

Les prévisions de ce savant ingénieur se sont complétement réalisées depuis 1824. En effet, on a construit en France plus de trois cents ponts suspendus, et les neuf dixièmes de ces ponts ont été concédés à l'industrie privée, qui les a fait établir par ses ingénieurs.

Il serait très intéressant d'avoir une statistique complète de ces ponts, de comparer les dépenses faites pour les ponts construits par l'administration publique et celles faites pour les ponts construits par les associations industrielles, de rechercher les rapports des dépenses avec les produits, et d'établir enfin dans quels frais immenses le pays eût été entraîné si tous ces ponts avaient été construits dans le système des ponts fixes. Mais ces recherches sont en dehors du cadre que nous nous sommes proposé, et ce serait à l'administration supérieure, du reste, à faire dresser cette statistique, puisqu'elle a dans ses archives tous les éléments nécessaires pour l'établir avec exactitude.

Nous devons nous borner à indiquer que l'on peut, sans être taxé d'exagération, évaluer à 30 millions les dépenses faites pour la construction des ponts suspendus existant en France, et les produits, de 3 à 4 p. 100 de ce capital en moyenne. Si l'on avait fait construire ces ponts en pierre, la dépense se fût élevée bien certainement à 150 millions au minimum, parce que ces ponts ont été établis généralement sur des cours d'eau et dans des conditions qui présentaient les plus grandes difficultés.

Mais ce n'est pas seulement dans une économie d'argent que l'industrie des ponts suspendus a rendu des services au pays ; la facilité d'établir ces constructions à peu de frais a déterminé l'ouverture de routes départementales et de nouveaux chemins vicinaux, si nécessaires pour le développement comme pour la prospérité de l'agriculture et du commerce intérieur.

L'industrie des ponts suspendus a fait supprimer des bacs ou des gués sur des cours d'eau exposés à des crues subites, et où l'existence de ces passages dangereux donnait lieu chaque année à de graves accidents.

Est-ce sérieusement qu'on pourrait songer, comme certains ingénieurs en ont manifesté l'intention, à réduire à néant une industrie qui a rendu de si grands services? Evidemment non, car il reste beaucoup à faire encore, et son anéantissement deviendrait ainsi une mesure funeste au pays.

Et, en effet, lorsqu'on aura à franchir des cours d'eau dans des localités où la circulation ne peut être que très bornée, où des points d'appui dans le lit même devraient porter obstacle au mouvement de la navigation, où la distance à franchir sera considérable, et dans certaines autres circonstances déterminées, le principe de la suspension sera toujours appliqué avec succès sous toute espèce de rapports.

Mais pour développer de plus en plus l'industrie des ponts suspendus, il faut que l'administration publique vienne l'encourager, en la débarrassant de toutes les entraves qu'elle ne cesse d'apporter à la construction comme à l'exploitation de ces ponts.

Il faut, de son côté, que l'industrie privée n'établisse des ponts suspendus que dans les localités où ils sont applicables industriellement parlant ; il faut qu'elle profite de l'expérience, et qu'elle apporte dans leur établissement et leur entretien les conditions nécessaires pour les mettre à l'abri de toutes chances d'accident.

Nous verrons dans les chapitres suivants quelles sont les dispositions à prendre pour obtenir ces résultats.

Après avoir présenté quelques considérations générales, le rapporteur aborde la question technique.

QUESTIONS TECHNIQUES.

« Le principe de la suspension peut être appliqué de plusieurs manières différentes pour la construction des ponts : ainsi, des tiges inclinées partant de points fixes peuvent venir s'attacher à d'autres points, distribués sur la longueur du plancher ; ou bien des chaînes peuvent être tendues par des points fixes, et, dans ce cas, on fait reposer le plancher sur ces chaînes, ou on le suspend au dessous au moyen de tiges verticales. C'est cette dernière disposition qui a été généralement adoptée, et qui convient seule aux grands ouvrages.

Les ponts suspendus peuvent être à une ou plusieurs travées ; mais nous ne nous occuperons d'abord que des ponts à une seule travée, dans lesquels les deux culées servent à la fois de supports aux câbles et de points d'amarrage.

Les ponts que nous avons à considérer consistent dans un tablier suspendu par des tiges verticales à des chaînes plus ou moins tendues suivant des courbes paraboliques, et dont les extrémités sont attachées à des points fixes de part et d'autre de l'espace à franchir.

Comme les localités n'offrent pas généralement les moyens d'attacher les chaînes de suspension, on élève à cet effet des piliers ; et, pour empêcher leur déversement, on retient ces supports par d'autres chaînes, dites de retenue. On peut éviter la construction de ces piliers, souvent très coûteux, et toujours d'un aspect qui s'harmonise peu avec la légèreté du pont, en faisant passer les chaînes sur des supports ou bielles mobiles en fonte ; dans ce cas, les chaînes de suspension peuvent passer sur le sommet de ces bielles et venir s'amarrer directement dans les culées, ou bien les chaînes de suspension et les chaînes de retenue viennent s'attacher ensemble au sommet de ces supports mobiles.

Nous allons examiner successivement les conditions pratiques d'établissement de toutes les parties constitutives d'un pont suspendu construit dans les diverses conditions énoncées ci-dessus, et nous commencerons par les parties les plus simples. »

Au sujet de ce qui est dit dans ces considérations générales des *supports ou bielles mobiles*, un membre exprime l'opinion que l'on doit condamner l'emploi de ces moyens d'attache. Il attribue aux supports mobiles la chute du pont de la Basse-Chaîne à Angers, et pense que, malgré la perte de puissance qu'avaient éprouvée les câbles de suspension, le pont aurait résisté s'ils eussent été fixés à des piliers en maçonnerie. Il croit qu'un des fléaux,

enlevé par les oscillations imprimées au tablier, ne sera pas revenu à sa position normale et qu'il se sera rompu en retomban.; ce qui a occasionné la chute du pont.

Il rappelle, à l'appui de l'opinion qu'il vient d'énoncer, que la plupart des cas de rupture ont été constatés sur des ponts pour lesquels on avait adopté ce système de fléaux; il cite entre autres le pont de Brie, celui de Cavaillon et celui de Châteauneuf.

M. Vuigner, rapporteur, combat l'application au pont d'Angers des observations qui viennent d'être faites au sujet des supports mobiles. Les fléaux d'attache ne sont pour rien, suivant lui, dans le funeste accident dont la chute de ce pont a été la cause. Au moment où une partie des troupes était engagée sur le tablier, les hommes qui étaient demeurés sur la rive ont entendu un bruit sourd, comme celui d'un feu de peloton mal nourri, et c'est à la suite de ce bruit que le pont est tombé.

On doit donc en conclure que ce sont les câbles qui ont cédé successivement, et non pas la rupture de la bielle qui a amené celle des chaînes. M. Vuigner ajoute que le câble s'est rompu précisément au point où il se trouvait affaibli par l'oxydation des fils de fer.

Toutes les questions spéciales aux causes de la chute du pont d'Angers devant faire l'objet d'un examen particulier à la suite du rapport, M. Vuigner demande que, dans la discussion générale sur les principes de la construction des ponts suspendus, on réserve tout ce qui pourrait être relatif au pont de la Basse-Chaîne.

Cet ordre de discussion est adopté, et l'on passe à la discussion de la partie du rapport relative à la construction du tablier des ponts suspendus.

TABLIER.

« Le tablier d'un pont suspendu est composé de poutrelles ou pièces de pont reliées par des longrines ou longerons d'un premier plancher ou plattelage reposant sur les poutrelles; d'un second plancher ou doublage, de garde-corps, et souvent de trottoirs spéciaux pour le passage des piétons.

POUTRELLES OU PIÈCES DE PONT.

Les poutrelles sont en général espacées également d'axe en axe, et elles sont soutenues vers leurs extrémités par des tiges verticales qui les relient aux chaînes de suspension. Cet espacement est inégal lorsqu'on veut distribuer les tiges verticales sur des longueurs égales de la courbe des chaînes de suspension, mais il est préférable de conserver l'égalité entre les distances des tiges verticales.

L'écartement entre les axes des poutrelles a varié jusqu'ici dans les limites de 1 à $1^{m},50$; l'écartement moyen, $1^{m},20$, paraît être le plus convenable.

Cette largeur, ou, pour mieux dire, l'espace compris entre les faces intérieures des garde-corps des tabliers ne peut pas être fixée arbitrairement; elle doit être en rapport avec l'importance de la circulation présumée des piétons et des voitures. On a donné, au contraire, à beaucoup de ponts qui

sont dans des conditions de circulation tout à fait identiques, des largeurs différentes, variant dans les limites de 5 à 8m ; il y a évidemment, pour certains de ces ponts, augmentation en pure perte des frais de premier établissement, et une dépense annuelle d'entretien tout à fait anormale, qui absorbe une grande partie des avantages de la spéculation.

L'expérience a consacré des largeurs qui peuvent satisfaire à toutes les exigences d'un mouvement de voitures et de piétons sur un pont suspendu soumis au péage, et que l'on ne devrait pas dépasser dorénavant.

Ainsi, pour les ponts communaux, où la circulation est ordinairement restreinte, on peut se borner à une largeur de 4m,20, dont 2m,40 pour la voie charretière, et 1m,80 pour deux trottoirs de chacun 90 centimètres.

Pour un pont à construire sur une route départementale ou dans une ville secondaire où l'on ne doit compter que sur une circulation moyenne, une largeur de 5m,50 est suffisante ; elle satisfait à la condition du croisement de deux voitures. Mais on n'établit pas de trottoirs dans ce cas ; on place des bute-roues latéraux, pour former au besoin des garages pour les piétons.

Pour un pont à établir sur une route fréquentée, où l'on doit assurer la libre circulation des voitures et des piétons, il faut une largeur de 7 mètres, dont 5 mètres pour la voie charretière et 2 mètres pour deux trottoirs de 1 mètre chacun.

Dans ces diverses conditions, il suffit de relier les poutrelles aux chaînes de suspension seulement vers leurs extrémités, et l'on peut déterminer facilement leurs dimensions. Ces poutrelles peuvent être considérées, en effet, comme des pièces de bois placées sur deux appuis dont l'écartement serait égal à la largeur entre les tiges verticales, et qui auraient pour charge permanente le poids de tout le tablier compris entre deux entre-axes, et une surcharge de 5,000 kilog. entre les trottoirs pour les ponts à une voie, et de 10,000 kilog. entre les bute-roues ou les trottoirs pour les ponts à deux voies ; les surcharges représentent le poids d'une voiture fortement chargée passant sur le pont à une voie, ou celle de deux voitures se croisant sur un pont à deux voies.

On obtient ainsi des dimensions que l'on peut même dépasser, parce que, comme nous le verrons ultérieurement, il y a beaucoup plus d'avantage à augmenter qu'à diminuer le poids total des tabliers des ponts suspendus.

Dans les largeurs ci-dessus indiquées, les poutrelles se font ordinairement en bois de chêne ; mais pour les grandes portées il est préférable d'employer du sapin du Nord.

On n'obtient, en effet, souvent, dans le chêne, des pièces d'une longueur excédant 6 mètres, que dans des arbres vieux et dont le bois est cassant.

Le sapin du Nord, au contraire, comporte facilement de grandes dimensions, et, comme ses fibres sont très élastiques, il reprend naturellement sa forme première quand la force qui l'infléchit cesse d'agir.

On peut aussi, maintenant, lui faire subir une préparation qui lui assure une durée aussi longue que celle du chêne.

On a fait enfin des poutrelles en fer forgé ou même en tôle sous forme de tuyaux.

Le prix de revient des bois et des fers dans les localités où l'on opère doit évidemment guider le constructeur pour le choix à faire entre ces divers systèmes, en combinant bien ensemble les conditions de premier établissement avec celles d'entretien.

Quelle que soit la nature des poutrelles, il faut leur donner de la convexité à la surface supérieure pour obtenir à la surface des planches un bombement convenable qui assure transversalement l'écoulement des eaux de pluie.

La limite de 7 mètres que nous avons indiquée comme maxima pour les ponts suspendus à péage est suffisante pour une circulation très active. Ce qui s'est passé sur les ponts de Paris avant le rachat des concessions donne la preuve la plus convaincante de l'exactitude de cette assertion. — Mais si l'on voulait établir un pont suspendu avec circulation gratuite dans un grand centre de population, et où l'on devrait compter en conséquence sur une circulation plus active encore des voitures et des piétons, il faudrait augmenter cette largeur : dans ce cas, il ne suffirait pas de faire supporter les poutrelles à leurs extrémités ; il faudrait former trois plans de suspension, et le tablier du pont serait alors divisé en deux parties, l'une pour aller dans une direction, et l'autre pour aller en sens contraire.

On pourrait aussi, dans ce système, former les pièces des ponts en deux parties, pour éviter l'emploi de bois d'une grande longueur et faciliter leur remplacement en cas de réparation. Ces dispositions sont indispensables pour éviter les inconvénients qu'on rencontre dans le pont suspendu construit sur la Seine pour relier les boulevards extérieurs près des barrières de Bercy et de la Gare, où la largeur entre les points d'attache de certaines poutrelles est de 9 mètres au moins.

Les poutrelles ont $9^{m},50$ de longueur ; elles sont formées de deux pièces de bois en moises ayant chacune $0,^{m}40$ de hauteur au milieu et $0^{m},30$ aux extrémités, sur $0^{m},10$ de largeur ; une aire en bois de $0^{m},06$ d'épaisseur vient remplir l'intervalle qui les sépare sur les $2/3$ environ de leur longueur. On les pose avec une convexité qui détermine un bombement de $0^{m},10$; en moins d'un an cette convexité disparaît, et la courbe prend au contraire de la concavité.

Cette expérience de fait est un des motifs puissants pour ne pas dépasser, comme nous l'avons déjà dit, la limite de 7 mètres de largeur pour les ponts suspendus à péage. »

L'opinion exprimée dans le rapport au sujet de l'emploi d'un troisième cours de câble pour la suspension des ponts de plus de 7 mètres de largeur est l'objet de nombreuses observations.

Un membre combat le système recommandé dans le rapport, et croit que l'on ne doit employer trois cours de suspension que quand on donne au tablier une largeur de 11 à 12 mètres ; mais qu'au dessous de cette largeur, il ne faut employer que deux cours de suspension. Il dit qu'on peut très bien avoir des poutrelles rigides de 10 mètres de portée ; qu'il suffit pour cela de les armer. Il pense que le nombre des cours de suspension doit être déterminé par la circulation sur le pont ; que, si cette circulation est telle que trois voitures doivent s'y croiser, il ne faut pas mettre trois cours de suspension, car, dans ce cas, on supprimerait, de fait, une largeur de voie, et on n'en aurait plus que deux, l'une montante, l'autre descendante, de telle sorte

que, si une voiture vient à se rompre sur le pont, la circulation se trouve forcément interrompue dans un sens, et il ne reste plus de libre que le passage d'une seule voiture. De là cette conséquence, qu'on ne doit mettre trois cours de suspension que quand le pont est assez large (10 à 12 mètres) pour permettre à quatre voitures de s'y croiser, parce qu'alors on a un passage libre pour deux voitures dans un sens à droite des cours de suspension du milieu, et un autre aussi pour deux voitures, dans l'autre sens à gauche.

M. le rapporteur ne partage pas l'avis qui vient d'être exprimé. Il pense que, dans un pont de 7 mètres de largeur, il serait plus coûteux d'armer toutes les poutrelles pour leur donner de la rigidité, que d'employer un troisième cours de suspension. — La Commission a examiné cette question, et elle ne pense pas qu'au delà de 7 mètres, il soit prudent de n'employer que deux cours de suspension.

Un membre insiste sur la dépense qu'entraînerait l'armature des poutrelles pour les ponts de 8, 9 ou 10 mètres de largeur. Il croit qu'il est préférable, sous le rapport de la dépense, d'employer un troisième cours de suspension.

Un autre membre émet l'opinion que le nombre des cours de suspension ne doit pas être déterminé par la largeur du pont, ni par la circulation, mais bien par la portée du tablier et par le plus ou moins de rigidité qu'il est important de lui donner s'il doit être exposé à de fortes bourrasques, s'il est placé très haut au dessus des eaux, etc. C'est cette rigidité indispensable qui exige, en dehors de toutes les circonstances de largeur de pont et de circulation, que l'on emploie trois cours de suspension; tandis qu'avec la même largeur et la même circulation, il suffit, dans d'autres localités, d'avoir deux cours de suspension.

Un membre pense que, même au delà de 10 mètres de largeur pour les grandes portées, il suffit d'avoir deux cours de suspension, puisqu'on peut donner au tablier toute la rigidité désirable au moyen d'autres chaînes de suspension placées au dessous du tablier, diagonalement à l'axe du pont, et n'ayant que 1 mètre de flèche au maximum sur 50^{m} de portée, comme on l'a fait dans deux ponts suspendus construits récemment sur le Rhône, à Lyon. — On prévient ainsi tout à la fois les oscillations verticales et les oscillations horizontales.

L'un des préopinants répond que, malgré cette disposition, on ne pourra pas éviter les oscillations horizontales; que l'on avait placé des haubans sous le tablier du pont de Cavaillon, ce qui ne l'a pas empêché de tomber. Ils étaient, il est vrai, dans un plan horizontal; mais il ne croit pas qu'on puisse employer souvent des chaînes de suspension en dessous du tablier, parce qu'il faut leur donner une certaine flèche et que l'on est presque toujours gêné par la hauteur du tablier au dessus des eaux, laquelle est fixée par l'administration publique. En conséquence, il est d'avis qu'il vaut mieux mettre plusieurs parapets sur le pont, ce qui donne une grande rigidité au tablier sans gêner la circulation.

Un membre du bureau est d'avis que toutes les fois que le tablier est assez élevé au dessus des eaux, il faut toujours mettre en dessous un autre cours de suspension, disposé diagonalement à l'axe du pont.

Le rapporteur rappelle que la commission n'a pas admis une largeur de

plus de 7 mètres avec deux cours de suspension seulement; mais il croit qu'au delà de cette largeur, il y a d'autres conditions à remplir pour avoir dans le tablier une rigidité suffisante.

Un membre du bureau dit que le nombre des cours de suspension ne peut être fixé *a priori* d'une manière absolue; que tel système peut être bon quand on emploie des câbles en fil de fer, qui serait vicieux si l'on se servait de lames ou de barres pour composer la chaîne de suspension. Quand on a bien distribué le métal dans la composition de la chaîne (si l'on emploie le fer marchand), on peut atteindre de plus grandes portées et de plus grandes largeurs de pont avec plusieurs cours de suspensions qu'en étageant plusieurs chaînes les unes au dessous des autres, disposées suivant deux cours seulement, parce que, dans ce dernier cas, la dilatation ne se faisant pas de la même manière dans les divers étages de chaînes, celles qui sont en dessus doivent peser sur celles qui sont en dessous, et ce sont ces dernières qui en définitive portent toute la charge. C'est pour cette raison qu'on a donné quatre cours de suspension au pont de Menai, construit par M. Telford.

Ces dernières observations résumant les règles à suivre et les conditions à observer dans le choix des systèmes de suspension du tablier relativement à sa largeur et à sa portée, on passe au paragraphe suivant du rapport, consacré aux :

LONGRINES, LIERNES OU LONGERONS.

« Les poutrelles reçoivent plusieurs cours de longrines ou longerons qui servent à maintenir leur écartement, et sur lesquels sont établis les garde-corps et les trottoirs, lorsqu'il doit en exister sur les ponts.

Il est essentiel que ces longerons aient une grande longueur pour répartir la charge sur un très grand nombre de poutrelles et diminuer le nombre des assemblages. On les fait indifféremment jusqu'à présent en chêne ou en sapin; mais il est préférable d'employer le sapin, par des motifs semblables à ceux indiqués plus haut pour les poutrelles.

Dans les ponts à deux voies, il serait utile, en outre des longerons de garde-corps et de trottoirs, de placer sous les poutrelles, au milieu du tablier, deux cours de longrines qui tendraient encore à répartir le poids d'une charge accidentelle sur un plus grand nombre de poutrelles et à en prévenir la flexion. On diminuerait aussi les chances de leur rupture et les accidents qui peuvent en être la conséquence.

Si l'on construisait un pont d'une largeur excédant 7 mètres, et disposé comme nous l'avons indiqué ci-dessus, pour que les voitures aillent d'un côté dans un sens et reviennent par l'autre, il faudrait établir deux cours de longrines, une de chaque côté des tiges verticales de la suspension du milieu; elles auraient le double but de servir de bute-roues et de produire les effets dont nous avons parlé ci-dessus.

PREMIER PLANCHER OU PLATTELAGE.

Le premier plancher ou plattelage repose directement sur les poutrelles,

entre les longerons de trottoirs ou les longerons de garde-corps, quand il n'y a pas de trottoirs; il est composé de plusieurs cours de madriers, qu'on espace de $0^m,03$ à $0^m,04$ pour faciliter l'écoulement des eaux et la circulation de l'air. Il faut donner à ces madriers une longueur suffisante pour reposer au moins sur quatre poutrelles et avoir le soin de faire chevaucher les joints. On répartit alors la charge sur une très grande surface.

Le bois de chêne est généralement adopté pour ce premier plancher, parce que, dans les conditions où il est placé, il offre plus de garantie de durée que les bois des autres essences.

On a donné jusqu'ici à ces madriers une épaisseur variant dans les limites de $0^m,07$ à $0^m,10$; mais en donnant aux poutrelles un espacement moyen de $1^m,20$ on peut se borner à une épaisseur de $0^m,07$ à $0^m,08$.

SECOND PLANCHER OU DOUBLAGE.

Le second plancher ou doublage est formé avec des planches clouées sur les madriers du premier plancher. L'épaisseur de ces planches ne doit pas être moindre de $0^m,05$. On emploie diverses essences de bois, qui peuvent être classés, d'après la durée, dans l'ordre suivant :

Le mélèse,
Le pin résineux,
L'orme tortillard,
Le chêne,
Le sapin du Nord,
Le peuplier.

Les planches de cette dernière essence, dont le prix est peu élevé et qui offrent le plus de prise aux pieds des chevaux, sont assez en usage; mais on obtient aussi de très bons résultats avec des planches en orme tortillard d'une faible largeur.

Le doublage est exposé continuellement aux intermittences de sécheresse et d'humidité; il est soumis à l'action écrasante des roues de voitures fortement chargées et à l'action arrachante des pieds des chevaux : aussi la durée en est-elle très bornée, et exige-t-il un entretien journalier très considérable.

Des constructeurs ont fait divers essais pour prolonger cette durée; mais les résultats obtenus jusqu'ici n'ont pas encore eu tout le succès désirable. Le meilleur parti à prendre, c'est de n'employer que des planches de faible largeur et de les placer en écharpe sous un angle de 45°, au lieu de les disposer perpendiculairement à l'axe du pont, comme on l'a fait jusqu'à présent. Les fibres du bois pour le même madrier présentant alors une plus grande longueur au piétinement des chevaux, et le bois en long résistant mieux à cette action, elles sont arrachées moins promptement. On peut aussi, en employant les essences de bois un peu spongieux, augmenter leur durée en les faisant préparer à l'avance au sulfate de cuivre ou au sulfate de fer combiné avec du sulfate de barium.

GARDE-CORPS.

Si les garde-corps des ponts suspendus ne devaient servir qu'à l'usage auquel ils paraissent destinés, on pourrait leur donner une très grande légèreté; mais, dans l'espèce, il faut obtenir un autre résultat.

Dans les ponts américains, ce sont les parapets qui supportent le tablier; il faut que, dans les ponts suspendus, les garde-corps soient disposés pour produire un effet semblable, c'est-à-dire qu'ils offrent une rigidité suffisante pour s'opposer à la flexion du plancher sous l'action d'une charge accidentelle, en reportant le poids de cette charge sur une plus grande longueur de plancher.

Ce n'est qu'ainsi qu'on peut prévenir les inflexions considérables que l'on remarque à certains ponts, et dont l'effet est de disloquer tous les assemblages des bois formant le tablier, d'augmenter d'une manière notable la traction sur le pont et de déterminer la prompte détérioration du doublage par l'excès d'efforts que les chevaux sont obligés d'y faire.

Pour atteindre ce but, il ne faut pas craindre de donner de la force aux pièces de bois qui doivent composer les garde-corps; il faut éviter avec soin l'emploi des pièces verticales, qui s'opposent au serrage des boulons, et disposer ces pièces en conséquence, de manière qu'elles ne forment entre elles que des triangles; il faut, enfin, placer les écrous des boulons de telle sorte qu'on puisse les resserrer facilement au besoin, lorsque, après un certain temps, les bois ont pris du jeu dans leurs assemblages. Si l'on n'avait pas cette précaution, les garde-corps perdraient bientôt leur influence primitive sur la rigidité du tablier.

TROTTOIRS.

On forme les trottoirs pour les piétons d'une manière toute simple, en clouant sur les longerons disposés à les recevoir des planches dans une direction normale à l'axe du pont; on emploie le plus ordinairement à cet effet des planches en chêne ou en sapin du Nord, de $0^m,03$ à $0^m,04$ d'épaisseur.

Pour les ponts où il n'y a pas de trottoirs, on avait songé d'abord à employer des bute-roues en fer forgé ou en fonte, qui venaient s'adapter dans leur partie supérieure à une pièce de garde-corps, et, dans leur partie inférieure, aux pièces de pont; mais on a bientôt renoncé à ce système, qui présente des inconvénients sous toutes espèces de rapports.

La disposition la plus convenable consiste à établir sur chaque rive un cours de longerons en dedans des tiges de suspension : ce longeron a le double avantage alors de former bute-roues dans toute la longueur du pont et d'augmenter la rigidité du tablier, comme nous l'avons indiqué à diverses reprises.

MOYENS A EMPLOYER POUR PRÉSERVER LE BOIS DES TABLIERS D'UNE PROMPTE DÉTÉRIORATION.

On ne saurait prendre trop de soins pour préserver le bois des tabliers

des ponts d'une prompte détérioration; ce n'est qu'ainsi qu'on peut arriver à diminuer les dépenses d'entretien.

On donne ordinairement plusieurs couches de peintures aux bois des garde-corps, aux pièces de ponts et aux longerons, et l'on goudronne le bois des planchers et des trottoirs; mais en général on n'apporte pas assez de surveillance dans ces travaux secondaires : ainsi le masticage avant la première couche de peinture n'est pas souvent assez complet; les peintres se servent de peinture où l'huile est en trop faible proportion, et ils l'appliquent parfois sur des bois trop humides; on emploie souvent aussi des goudrons composés de produits qui contiennent des matières plutôt nuisibles que conservatrices.

Les constructeurs devraient faire faire toutes les expériences nécessaires et exercer une surveillance suffisante pour éviter ces vices de construction.

D'un autre côté, on ne se préoccupe pas assez des assemblages des pièces de bois en contact. Il faudrait avoir le soin d'imprégner toutes ses surfaces avant la pose. Ce qui réussit le mieux à cet effet, c'est l'huile lithargée imprégnée à chaud.

Il y aurait certainement un grand avantage à faire préparer tous les bois de ponts suspendus au moyen des procédés en usage, et dont les plus efficaces sont le système Payn et le système Knab; on retrouverait évidemment dans l'économie de dépense d'entretien la compensation des frais préparatoires, dont la dépense ne s'élève pas à plus de 10 fr. par stère de bois.

Il faut enfin, autant que possible, éviter l'altération dans la force des bois, déterminée par les percements de trous de boulons qui deviennent des foyers de détérioration. On obtient ce résultat en entourant les poutrelles, les longerons et les autres pièces, par des brides ou des étriers disposés pour être resserrés au besoin. »

Après avoir résumé le texte qui précède, M. le rapporteur explique que la commission est entrée dans tous ces détails pour ne rien omettre des conditions pratiques à observer dans la construction des ponts suspendus, et déduire ensuite plus sûrement, d'après l'examen du système de construction du pont d'Angers, si la chute de cet ouvrage doit être attribuée à une cause purement accidentelle et impossible à prévoir, ou à l'inobservation d'un des principes essentiels qui règlent ce mode de construction.

Un membre ajoute quelques considérations à l'appui de ce que vient de dire M. le rapporteur. Il est d'avis que la commission a parfaitement compris sa mission, et que la Société ne saurait trop rappeler aux constructeurs les principes dont ils s'écartent si souvent. Ainsi, il existe des ponts suspendus dont les garde-corps n'ont aucune rigidité, dont les poutrelles sont trop minces et trop flexibles, dont les trottoirs sont formés avec des longrines d'un équarrissage trop faible; or il résulte de ce défaut de rigidité du tablier que les barres de suspension ont toutes successivement à supporter le mouvement des efforts produits par le passage des charges.

Le rapporteur est d'avis qu'il faut toujours placer sous le trottoir un second cours de longrines.

Un membre demande si la commission s'est préoccupée de la nature des bois à employer, et surtout de la question de savoir si l'on doit avoir recours à l'emploi des bois préparés pour obtenir une plus longue durée des ouvra-

ges. L'orateur pense que toutes les préparations que l'on fait subir au bois en vue d'augmenter sa durée lui ôtent une grande partie de sa force; qu'il ne faut pas compter, pour les bois soumis aux procédés de préservation, sur la même rigidité que quand ils ne sont pas préparés.

Un membre du bureau répond à cette observation que le rapport sur les ponts suspendus traite d'une manière générale la question de préparation des bois; mais que la question spéciale, avec toutes les expériences sur la solidité et l'élasticité des bois préparés, fait l'objet des études d'une commission nommée *ad hoc* dans l'une des précédentes séances.

M. le rapporteur reprend la lecture de son travail et passe à l'un des chapitres les plus importants, dont voici le texte :

CHAINES DE SUSPENSION, DE RETENUE, TIGES VERTICALES DE SUSPENSION.

Dans les ponts suspendus, les parties les plus essentielles, celles qui soutiennent le poids du plancher et des fardeaux auxquels ce plancher donne passage, se trouvent tendues dans le sens de la longueur. La solidité de l'édifice dépend ainsi de la résistance de ces pièces à l'extension. Les ponts dont il s'agit diffèrent essentiellement sous ce rapport des autres ponts, où les pièces principales ne sont jamais disposées qu'à fléchir ou à se contracter.

Les chaînes de suspension, les chaînes de retenue ou d'amarrage et les tiges des ponts suspendus doivent donc être construites avec des substances capables d'une grande résistance à la traction. On se sert uniquement à cet effet du fer pour les ponts que nous considérons; seulement on peut l'employer en barres, en fils ou en lames.

Quelques essais seulement ont été faits en lames superposées; mais les barres en fer forgé et le fil de fer ont été plus généralement adoptés pour la construction des ponts suspendus.

CHAINES DE SUSPENSION.

Nous avons dit que les ponts que nous avions à considérer consistaient en un tablier suspendu par des tiges verticales à des chaînes plus ou moins tendues.

Personne n'ignore que plus on emploie de force pour tendre les chaînes de suspension, moins il leur en reste pour supporter le tablier et les charges accidentelles qu'il est destiné à recevoir. Il paraîtrait résulter de ce fait qu'il est avantageux de ne tendre les chaînes de suspension que de manière à leur laisser former une courbe qui ait une très grande flèche; mais, comme les vibrations du pont, qui ne laissent pas que de présenter d'assez grands inconvénients sous toute espèce de rapports, augmentent rapidement avec cette flèche, il est important de la réduire dans des proportions telles qu'il y ait une balance convenable entre les avantages d'une faible tension et les inconvénients des vibrations considérables.

On sait que la flèche des chaînes de suspension est la distance verticale

entre le point le plus bas de la courbe parabolique et le point le plus haut, qui se trouve leur point d'attache ou d'inflexion.

L'ouverture des chaînes est le double de la distance horizontale du point le plus bas au point le plus haut.

C'est le rapport entre la flèche et l'ouverture qu'il est indispensable de déterminer d'une manière convenable. De ce rapport, en effet, dépendent l'amplitude des oscillations et les inflexions produites par une charge accidentelle sur le tablier du pont, comme nous l'avons indiqué déjà. Cette amplitude est proportionnelle à la flèche; mais, d'un autre côté, elle est réciproque à la largeur et au poids du tablier par mètre courant. Ainsi plus le tablier est lourd, moins l'effet produit par le passage d'une voiture est sensible, et plus alors le rapport de la flèche à l'ouverture peut être considérable; mais pour un pont d'une faible portée à une voie, au contraire, il faut que la flèche soit faible. Il est évident qu'on peut arriver ainsi à une limite telle, que l'augmentation de dimension des chaînes et des maçonneries du pont détermine une dépense qui absorbe l'économie de l'application du principe de la suspension, et c'est ce qui explique que ce principe n'est réellement applicable que pour franchir des cours d'eau d'une certaine largeur.

Le rapport entre la flèche et l'ouverture des chaînes peut varier entre 1/7 et 1/25; mais les rapports suivants sont ceux que l'on adopte ordinairement et qui conviennent le mieux pour contrebalancer les avantages et les inconvénients indiqués ci-dessus :

1/12 pour un pont d'une voie d'une faible portée;
1/10 pour un pont à deux voies sans trottoirs;
1/8 pour les ponts à deux voies avec trottoirs.

Nous avons indiqué qu'on employait, pour la suspension, du fer en barre, en fil ou en lame.

Dans l'origine de la construction des ponts suspendus en France, aucune limite n'avait été imposée pour le maximum d'effort à l'extension à faire supporter au fer; mais la chute de plusieurs ponts, déterminée soit par le fait de mauvaises dispositions, soit par le fait de l'emploi de matériaux défectueux, éveilla l'attention de l'administration supérieure.

Attribuant purement et simplement à un effet de traction supporté par le fer les accidents survenus, elle a cru qu'en restreignant l'effort de traction du fer dans des limites étroites elle préviendrait de nouveaux accidents. L'expérience ne tarda pas à démontrer le contraire, et l'administration supérieure reconnut qu'il y avait à considérer aussi les autres matériaux employés dans la construction des ponts suspendus, et que les limites trop restreintes qu'elle avait imposées apportaient des entraves à la propagation de ce système de construction. Elle revint alors sur ses premières déterminations, et elle s'arrêta définitivement aux maxima suivants :

18 kil.	par millim. carré	pour le fil de fer;
12 kil.	id.	pour le fer en barres;
12 kil.	id.	pour le fer en lames.

Ces résistances maxima s'appliquent non seulement aux chaînes de suspension, mais aux fers de chaînes d'amarrage ou de retenue et à ceux des tiges de suspension.

Ces limites uniques des efforts de traction à faire supporter au fer dans la construction de tous les ponts suspendus ne sont aucunement rationnelles, car la résistance absolue du fer est très variable, en raison de la qualité du minerai qui le compose, et du mode comme du plus ou moins de soins apportés à sa fabrication.

Cette servitude, imposée aux constructeurs d'une manière absolue, ne pouvait que produire des résultats autres que ceux que l'administration croyait en attendre. Les constructeurs n'ont aucun avantage, en effet, à rechercher la meilleure qualité du fer, et ils ont intérêt, au contraire, à se servir de celui qui est au plus bas prix. Aussi, depuis que l'administration a adopté les coefficients uniformes ci-dessus déterminés, emploie-t-on généralement, dans la construction des ponts suspendus, des fils de fer d'une qualité médiocre, d'une valeur de 50 à 55 fr. les 100 kil., mais dont la résistance absolue est à peine de 50 kil., au lieu de se servir, comme dans l'origine, de fils de fer de roche d'un prix de 70 fr. les 100 kil., dont la résistance absolue s'élevait jusqu'à 90 kil. On voit donc que les chances d'accidents ont plutôt été augmentées que diminuées par le fait des prescriptions trop absolues du gouvernement.

Il eût été plus rationnel évidemment de limiter l'effort de traction du fer employé dans les chaînes et les tiges des ponts suspendus à une fraction de sa résistance réelle et absolue; tous les ponts se seraient trouvés alors dans les mêmes conditions.

Les constructeurs auraient eu intérêt à employer les fers les plus résistants, et dans les forges on se serait étudié à augmenter leur ténacité.

La fraction convenable de la force réelle du fer à l'extension peut être déterminée d'une manière très simple : la condition à remplir, c'est que l'effort maximum ne puisse pas altérer la ténacité. Ainsi, par exemple, l'effort maximum auquel doivent résister les chaînes, lors de l'épreuve, ne doit pas produire sur elles un allongement sensible; et si, en admettant que les maçonneries n'aient pas éprouvé de mouvement, les chaînes ne reprenaient pas, après l'épreuve, leur position première, il y aurait altération notable et nuisible du fer, comme cela est arrivé sur quelques uns, et notamment pour un pont construit dans la vallée de la Marne. C'est ce qu'il faut éviter.

Les limites de 12 kil. pour les fers en barres et de 18 kil. pour les fils de fer ont été basées sur la résistance moyenne des fers dans ces deux conditions, et c'est le coefficient de 1/4 qu'on a voulu adopter; mais, en réalité, le coefficient, pour certains ponts, est resté au dessous du 1/3. Au pont de Fribourg, l'effort de traction a été porté à 30 kil. par millimètre carré : c'est le 1/3 de la résistance absolue à l'extension des fils de fer employés dans cette construction.

En Angleterre, on adopte généralement aussi le coefficient du tiers.

Au pont de Tournan, qui est construit depuis vingt-quatre ans, et où l'on n'a remarqué jusqu'ici aucune altération, les chaînes et les tiges en fil de fer ne supportent que le 1/4 de la charge qui en déterminerait la rupture.

On pourrait trouver que cette proportion est trop faible, en observant surtout que dans les constructions ordinaires on la porte au 1/3 et même à la 1/2 dans le bâtiment; mais il y a une différence notable entre l'effort que

supportent les fers dans les ponts et dans les maisons. Si l'essieu, par exemple, d'une lourde charrette, venait à se rompre sur un pont, le choc qui en résulterait produirait une force vive beaucoup plus dangereuse que la charge permanente supportée par les fers employés en tirants dans le bâtiment.

D'un autre côté, il faut tenir compte des défauts cachés qui peuvent se trouver dans les fers; et, pour les câbles notamment, il faut avoir égard à ces considérations diverses, que les brins peuvent n'être pas également tendus, et que ceux qui sont à la surface peuvent parfois subir une détérioration plus prompte que les autres.

Dans cette situation, nous pensons qu'il faut adopter le coefficient du 1/4 pour l'effort maximum à faire supporter aux fers des chaînes et des tiges des ponts suspendus.

La tension exercée sur le câble dépend de la largeur du pont, de l'ouverture et de la flèche de la chaîne, du poids de tout le système en suspension par mètre courant, et d'une surcharge sur le tablier, qu'on porte ordinairement à 200 kil. par mètre superficiel pour les ponts que nous considérons. Ces éléments servent à déterminer l'aire de ces chaînes, suivant qu'elles sont en barres, en fils ou en lames.

La surcharge de 200 kil. par mètre superficiel pourrait paraître faible, puisqu'elle ne représente guère que le poids d'autant d'hommes que le pont pourrait en contenir, en admettant trois hommes par mètre carré, et que ces hommes sont supposés immobiles; mais elle doit être suffisante en réduisant au 1/4 le coefficient de sécurité.

Pour les tiges verticales, il ne suffirait pas d'envisager seulement cette surcharge pour en déterminer les dimensions; il faut avoir égard, comme pour les poutrelles ou pièces de pont, à la condition du passage d'une voiture pesant 5,000 kil. sur le pont à une voie, et au croisement de deux voitures ayant chacune ce même poids pour le pont à deux voies. »

Ce chapitre donne lieu à une discussion, tant sous le rapport technique que sous celui du principe de la liberté absolue à laisser aux constructeurs, opposé au principe de la réglementation.

Un membre du bureau, répondant au passage du rapport relatif au coefficient de résistance des fers employés pour la suspension des ponts, exprime l'avis que le coefficient proposé par la commission ne doit pas plus être appliqué dans tous les cas que le coefficient actuel adopté par l'administration publique, sous peine de retomber dans tous les inconvénients de la réglementation, que l'on combat à si juste titre.

Les bons et les mauvais matériaux ne peuvent être soumis aux mêmes coefficients : tel fer pourra supporter un quart, un tiers et même une moitié de la charge de rupture; tandis qu'un autre fer n'en pourra supporter qu'un cinquième, un septième ou même un neuvième.

L'une des conséquences les plus fâcheuses de la réglementation a été, par exemple, de repousser et de rendre impossible l'emploi du fer marchand dans la construction des ponts suspendus, bien qu'il présentât plus que tout autre des garanties de résistance et surtout de conservation; mais avec les limites de résistance admises, sans égard à la qualité différente des matériaux, l'usage du fer marchand devenait trop dispendieux, ce qui y a fait renoncer.

Un autre point dont il importe également de tenir compte, et que le régime de la réglementation sacrifie, c'est la différence des systèmes de construction. Dans certains cas, en effet, tout le métal de la chaîne est affecté par les efforts de traction, comme dans le cas de l'emploi du fer marchand; tandis que dans d'autres une partie seulement supporte tous les efforts, comme lorsqu'on emploie le fil de fer. Il est donc irrationnel d'admettre, comme le propose la commission, pour tous les systèmes, le même coefficient. Pour rester dans le vrai, il serait indispensable d'en calculer de différents pour chaque qualité de matériaux et pour chaque système de construction.

En opposition au système de la réglementation, de ses embarras, de ses difficultés et de ses inconvénients, l'opinant fait ressortir les avantages qui résultent pour l'Angleterre d'avoir laissé sur ce point une liberté absolue aux constructeurs. Les règles fixes ont toujours et partout le même inconvénient, celui d'être irrationnelles et de conduire précisément à un but tout opposé à celui que l'on avait eu en vue en les adoptant.

La commission aurait donc dû exposer et examiner dans son rapport :

1° La question de la liberté absolue laissée aux constructeurs quant aux efforts à faire supporter à leurs chaînes ;

2° Celle des moyens d'essais et de la détermination des coefficients, variables suivant les circonstances, les matériaux et les systèmes de construction ;

3° Celle de la réglementation actuelle.

Si la commission eût procédé ainsi, il n'est pas douteux qu'elle eût été conduite, par la force des choses et par la logique, à conclure d'une manière formelle en faveur du système de liberté complète, ayant pour sanction, comme en Angleterre, la responsabilité des entrepreneurs.

Un membre appuie les observations du préopinant. Il trouve que la fixation d'un coefficient absolu est, dans tous les cas, irrationnelle, qu'il s'agisse du tiers, du quart ou du cinquième. Si l'on suppose le tiers, qui est le chiffre de la commission, on verra qu'un fer résistant à 30 kilog. ne donnera que 20 kilog. pour les chances d'accident, tandis qu'un fer d'une bien meilleure qualité qui résiste à 60 kilog. donnera le double ou 40 kilog. pour les chances d'accidents. Mais, sur ces 40 kilog., il y en aura 20 de perdus pour l'entrepreneur dans le cas de la réglementation, et dès lors il continuera à y avoir un avantage notable pour lui à employer du fer d'une qualité inférieure.

Un membre dit que, lorsqu'on soumet du fer à des efforts de traction, il y a lieu d'observer trois périodes bien distinctes. Dans la première, le fer s'allonge d'une certaine quantité, et quand on le décharge il reprend sa longueur primitive; dans la seconde, quand la charge augmente au delà du premier point, le fer s'allonge davantage que la première fois, revient encore sur lui-même, mais ne reprend plus sa longueur primitive; dans la troisième, enfin, il s'allonge encore plus, sans se rompre il est vrai, mais il ne revient plus sur lui-même; au delà de ce point il y a rupture. La conclusion à tirer de ces faits est qu'il ne faut jamais faire supporter au métal plus que le 1/4 du poids qui produit l'allongement total.

M. le rapporteur répond aux différentes observations qui précèdent, et dit qu'en Angleterre, en Allemagne et au pont de Fribourg, on a admis que

le fer pouvait supporter le 1/3 de la charge de rupture ; qu'il ne faut pas oublier que nous sommes en France, où le régime de la réglementation est en vigueur, et que, ne pouvant s'y soustraire, il faut seulement chercher les moyens de l'améliorer en l'éclairant.

Un membre, revenant sur l'observation précédemment faite au sujet de l'élasticité du fer, soutient que la limite de cette élasticité n'est pas constante ; qu'elle varie au contraire suivant la qualité du métal, et que, dès lors, le coefficient cherché ne devrait pas être une fraction déterminée de la charge de rupture, mais bien une fraction de la charge qui donne la limite de l'élasticité du fer.

Un autre membre rappelle qu'il y a des fers pour lesquels la limite d'élasticité est très éloignée du point de rupture, tandis que pour d'autres elle est très rapprochée. Il croit donc qu'il serait très dangereux d'adopter un coefficient qui fût une fraction du poids produisant la limite d'élasticité, plutôt que celle du poids de rupture ; car pour une faible surcharge accidentelle on pourrait, dans certains cas, causer la chute d'un pont. Il demande comment, dans le cas de la liberté absolue, on pourrait garantir la sécurité publique.

Un membre répond qu'en Angleterre on fait des essais, et qu'on admet pour épreuve une charge de 5 à 600 kilog. par mètre carré de tablier.

Un membre de la commission fait observer que celle-ci a cherché à mettre tous les ponts suspendus dans des conditions générales, et surtout à encourager les constructeurs à employer les meilleurs fers possibles.

Un membre fait observer que, d'après les recherches faites par les commissaires anglais sur la résistance des matériaux, on est arrivé à des résultats qui ne permettent pas d'admettre un coefficient quelconque, car l'écrasement des fontes a varié entre une charge de 40 kilog. et une de 110 par millimètre carré, et que la rupture à la traction a varié entre $8^k.7$ et $18^k.7$.

On a construit en Angleterre beaucoup de ponts avec des poutres en fonte, relevées aux extrémités et armées avec des tirants en fer.

Beaucoup de ponts construits dans le Nord, là où la fonte est de qualité médiocre, se sont rompus, celui de Chester entre autres ; tandis qu'on n'a pas eu à constater de rupture dans le Sud, où l'on emploie d'excellentes fontes venant des usines du Staffordshire.

Le membre se déclare partisan de la liberté absolue sous ce rapport. Il pense que c'est justement parce qu'en France la réglementation est poussée jusqu'aux dernières limites, qu'il faut en parler et en signaler les inconvénients.

Il ajoute qu'avec cette réglementation on n'aurait pu construire en France le pont tubulaire de Menai.—En effet, dans cette occasion, les ingénieurs anglais ont reconnu, après de nombreux essais, que les conditions de solidité à réunir dans la construction d'un pont varient essentiellement selon que le poids du pont se rapproche ou diffère beaucoup de la charge qu'il doit supporter.

Ainsi, il est admis en principe que, dans les cas où le poids du pont est très petit par rapport à la charge, il faut prendre cette charge comme élément simple et y ajouter le poids du pont multiplié par le coefficient de rupture.

Mais si, au contraire, le poids du pont est très grand par rapport à la charge, c'est le poids du pont qu'il faut prendre comme élément simple, et y ajouter la charge multipliée par le coefficient de rupture.

Si l'on avait été obligé de soumettre dans ce cas le pont tubulaire de Menai à la réglementation actuellement en usage en France, il aurait fallu faire la somme du poids du pont et celle de la charge, et multiplier le tout par le coefficient de rupture; ce qui aurait donné un poids si énorme et une dépense tellement considérable qu'il eût fallu renoncer entièrement à entreprendre un travail aussi intéressant au point de vue de l'art qu'important pour les communications du pays.

Il est décidé, à la suite de cette discussion, que le rapport de la commission sera modifié en ce sens que les trois points de vue: de la liberté absolue, de la réglementation actuelle, et des réformes qu'il importe d'y introduire, si l'on ne peut la supprimer entièrement, seront l'objet de nouveaux développements, conçus dans l'esprit qui a prévalu dans le cours de la discussion.

SEANCE DU 7 MARS 1851.

Présidence de M. Auguste Perdonnet.

M. Yvon Villarceau remet un mémoire en deux parties sur la théorie de la stabilité des machines locomotives en mouvement. Il a la parole pour indiquer les résultats auxquels il est parvenu.

Il rappelle que dans la séance du 7 février il a énoncé quelques unes des conséquences auxquelles l'avait conduit sa théorie sur la stabilité des machines locomotives en mouvement, en les supposant non couplées.

Il a reconnu :

1° Qu'en supposant le bouton de la manivelle fixe et le poids du piston appliqué à l'extrémité libre de la bielle qui reçoit la tête de ce piston, le système de la bielle et du piston doit être en équilibre dans toutes les positions, ce qui ne peut avoir lieu que si l'on prolonge la bielle du côté de la manivelle et si l'on applique sur ce prolongement un contre-poids;

2° Que les masses des manivelles ou des bielles d'accouplement doivent satisfaire à des conditions déterminées par une équation qui comprend particulièrement les distances des plans du mouvement des centres de gravité des pièces mobiles;

3° Que les contre-poids, ainsi que les angles correspondants des roues, autres que la roue motrice, peuvent généralement se déterminer indépendamment de celui de cette dernière;

4° Que le contre-poids de la roue motrice et son angle correspondant doivent satisfaire à deux équations de condition;

5° Enfin, qu'il reste deux inégalités de second ordre dans le mouvement de galop, qui sont proportionnelles, l'une au carré de la vitesse, l'autre à la variation de la vitesse elle-même, et que l'on ne peut détruire dans le système actuel des machines locomotives. La première ne peut jamais être détruite; la seconde ne pourrait l'être, quelle que soit la variation de la vitesse, que par un abaissement du centre de gravité de la machine, ce qui est difficile, sinon impossible à réaliser. Cette dernière inégalité disparaît quand la vitesse est constante, c'est-à-dire qu'elle dépend essentiellement des modifications qu'on apportera dans la distribution de la vapeur.

M. Yvon, passant ensuite en revue les divers systèmes de machines, et déduisant pour chacun d'eux les conséquences de sa théorie, dit que :

1° Dans les machines non couplées à cylindres intérieurs, le plan des contre-poids doit coïncider avec celui qui contient les centres de gravité des bielles, des manivelles et des pistons. Il faut donc décomposer chaque contre-poids en deux, disposés de telle sorte que leur centre de gravité soit situé dans le plan indiqué ci-dessus. Si les machines non couplées ont leur cylindres extérieurs, il faut alors que le centre de gravité du contre-poids soit sur le prolongement de la manivelle, et il faut, dans les deux cas, que, le poids du piston et celui de la bielle transportés au bouton de la manivelle, la roue motrice armée de son contre-poids soit en équilibre autour de son axe dans toutes les positions du système. Il reste cependant une condition impossible à remplir pour l'équilibre dans ce premier cas.

2° Dans les machines à quatre roues couplées, la roue motrice étant au milieu, si l'on couple les deux roues d'arrière, le centre de gravité du contre-poids de la roue d'arrière doit être situé à l'opposé de la manivelle motrice; les contre-poids de la roue motrice et celui de la roue d'arrière doivent être opposées à la manivelle principale, et la somme des moments de ces contre-poids doit faire équilibre aux bielles, pistons, etc.

Si, au contraire, ce sont les roues d'avant qui sont couplées, le centre de gravité du contre-poids de la roue d'avant doit être dans la direction même de la manivelle, et non plus à l'opposé comme précédemment; celui du contre-poids de la roue motrice doit être placé à l'opposé de la manivelle; de plus, le contre-poids de la roue motrice doit être beaucoup plus fort que quand ce sont les roues d'arrière qui sont couplées.

Il faudrait donc en conclure qu'il vaut mieux coupler les roues d'arrière que les roues d'avant.

3° Dans les machines à six roues couplées, le problème est indéterminé relativement à la distribution des contre-poids. Si l'on se propose de rendre minima la somme des moments des contre-poids des roues d'avant et d'arrière, il faut que le contre-poids de la roue d'arrière soit à l'opposé de la manivelle, et celui de la roue d'avant dans le sens de la manivelle. Celui de la roue motrice se détermine au moyen des contre-poids des roues extrêmes, et son centre de gravité doit être placé à l'opposé de la manivelle. Si l'on ajoute à la condition précédente que le moment du contre-poids de la roue du milieu soit un minimum, il faut supprimer les contre-poids des roues d'avant.

Il dit ensuite que, sans calculs, on peut, pour les machines non couplées, vérifier trois des résultats qu'il a obtenus. Ainsi, il cherche à démontrer :

1° Que le contre-poids doit être sur l'axe de la manivelle ou sur son prolongement;

2° Que le centre de gravité de la bielle et du piston, transporté à la tête, doit passer par le bouton de la manivelle;

3° Le centre de gravité du contre-poids de la manivelle, du piston et de la bielle, condensés comme il vient d'être dit, doit être sur l'essieu moteur.

Ces conditions assurent l'immobilité du centre de gravité des pièces mobiles, lequel ne coïncide pas avec l'essieu moteur par suite de la position du centre de gravité du piston en avant de sa tête.

Dans la deuxième partie de son mémoire, M. Yvon donne les expressions complètes des variations qu'éprouvent dans le mouvement rectiligne les composantes, parallèles à trois axes rectangulaires, des réactions exercées par les rails sur les roues des machines locomotives, et des moments de ces réactions par rapport aux mêmes axes.

LE PRÉSIDENT remercie M. Yvon de sa communication, et annonce que cette théorie sera mise à l'ordre du jour pour être discutée dans une des prochaines séances.

On reprend ensuite la discussion sur la construction des ponts suspendus.

UN MEMBRE. Avant d'aborder de nouvelles questions techniques, il importe de compléter les observations dont les premiers chapitres du rapport ont été l'objet, afin de mettre la commission à même de formuler dans son travail l'opinion qui exprimera le mieux les sympathies de la Société.

La question la plus grave sur laquelle il est nécessaire de revenir est celle de la fixation des coefficients de travail des fers et celle du système de la réglementation.

L'intérêt public est le motif sur lequel repose la réglementation. Ce motif est respectable; mais ce n'est pas le méconnaître que d'examiner si le but est atteint ou compromis par le règlement, et si le résultat cherché ne serait pas plus sûrement obtenu par un autre système, celui de contrôle et de la surveillance, par exemple.

La réglementation préventive, qui prescrit des conditions rigoureuses de construction, a compromis ou retardé les progrès de toutes les industries auxquelles on l'a appliquée. Les ponts suspendus n'ont pas eu seuls à en souffrir; la construction des chaudières à vapeur, celle des voies de chemin de fer ont eu le même sort, et c'est moins encore l'industrie qui a supporté les conséquences fâcheuses de ce régime vicieux, que l'intérêt public, que l'on avait cependant en vue de servir. Quand la réglementation n'a pas été observée, ce qui a eu lieu souvent, de l'aveu même et avec la tolérance de l'administration, elle a retardé les progrès de la science, c'est-à-dire retardé pour le public le bénéfice et les avantages de ces progrès, et d'un autre côté, en dégageant la responsabilité des constructeurs, elle les a rendus plus hardis pour tout ce qui n'était pas réglementé, elle a détruit l'intérêt que, dans un autre système, ils auraient eu à rechercher les meilleurs matériaux et à faire le mieux possible.

Si, en regard de ces résultats de la réglementation, on oppose ceux obtenus par le contrôle et la surveillance des industries laissées libres d'agir sous leurs responsabilité, on sera frappé de la différence. Sans sortir de la France, l'exploitation des mines, la construction du matériel des chemins de fer, qui

sont surveillées, mais non réglementées, fournissent sous ce rapport des faits importants et dignes d'être étudiés. Des observations plus nombreuses encore peuvent être faites en Angleterre, où la liberté est complète, sans que l'intérêt public soit ni compromis, ni négligé. Cet intérêt est garanti par un contrôle efficace, par une surveillance intelligente, qui se préoccupe en même temps des progrès de l'art et de l'industrie.

Que ces deux systèmes soient étudiés dans leur principe et dans les conséquences de leur application, et il n'est pas douteux que le second, celui de la liberté, ayant pour sanction, d'une part, la responsabilité, de l'autre, un contrôle réel, une surveillance effective, sera trouvé préférable sous tous les rapports à la réglementation, qui ne fait qu'entraver l'industrie, et nuit, dès lors, à l'intérêt public, au lieu de le protéger.

Appliquée aux ponts suspendus, par exemple, la liberté eût permis aux entrepreneurs de choisir leurs matériaux ; elle eût mis leur intérêt particulier d'accord avec l'intérêt général, en leur faisant trouver de l'économie à rechercher les meilleurs fers, à les employer sous la forme la plus convenable, et tout le monde y eût gagné.

Toutes ces considérations méritent d'être pesées par la commission, et il y a lieu de l'inviter spécialement à examiner sous les points de vue suivants la question des limites d'efforts que l'on peut demander aux fers :

1° Liberté absolue, responsabilité effective et contrôle ;

2° Fixation d'un coefficient pour chaque système de construction et pour chaque nature de matériaux ;

3° Conséquences de la réglementation telle qu'elle existe actuellement.

LE RAPPORTEUR n'aperçoit pas d'analogie entre les ponts suspendus et les mines ou le matériel des chemins de fer. Il ne comprend pas dès lors comment le contrôle pourrait s'exercer de manière à remplacer, avec avantage pour l'industrie et une sécurité entière pour le public, les prescriptions réglementaires imposées en France aux constructeurs de ponts suspendus. Sans doute, la réglementation actuelle a des inconvénients ; elle repose sur des bases fausses, que la commission s'est attachée à rectifier, en en indiquant de nouvelles offrant toute garantie à la sécurité publique, et de nature à exciter les constructeurs à n'employer que des matériaux de la meilleure qualité. Si l'on préfère à ce système celui du simple contrôle, il faudrait faire connaître comment celui-ci pourra fonctionner utilement. On a parlé de l'Angleterre, où les constructeurs jouissent d'une liberté complète. Comment les choses se passent-elles dans ce pays? comment le contrôle y est-il exercé? C'est ce qu'il importerait de faire connaître.

LE PRÉOPINANT répond que c'est à la commission à s'enquérir des procédés en usage dans les autres pays et des avantages qu'ils peuvent offrir. Avant d'accepter le système de la réglementation préventive et des coefficients officiels du travail des fers, la commission aurait dû examiner d'abord si ces coefficients étaient utiles à prescrire, et si le régime de la liberté absolue ne donnait pas tout autant et même plus de garanties, en encourageant l'emploi de bons matériaux.

UN MEMBRE. A l'époque où les constructeurs avaient la liberté la plus complète, des ponts sont tombés au moment des épreuves. Depuis l'inter-

vention de l'administration, qui fixa et limita le travail du fer dans le but de prévenir de nouvelles chutes, il en est tombé autant.

Il ne faut pas attribuer la chute des ponts à la rupture des câbles. Il est impossible de citer des exemples de câbles en fil de fer rompus au moment des épreuves. En général, les chutes pendant l'essai proviennent de mauvaises dispositions d'ensemble ou de détails, de l'emploi de matériaux qui n'ont pu supporter les efforts auxquels on les a soumis, comme les goujons d'amarre en fer ou en fonte, les supports en fonte, les pierres de taille servant de points d'appui ou d'amarrages, les maçonneries mal confectionnées servant de supports ou de massifs d'amarre, etc.

La conséquence de la limite imposée par l'administration sous le rapport de la sécurité est non seulement nulle, mais d'un effet contraire, car cette limite ne sert qu'à encourager le constructeur à employer des fers à bon marché.

Au point de vue du développement de l'industrie des ponts suspendus en France, la conséquence a été de faire employer inutilement plus de fer qu'il n'en faut quand il est de bonne qualité, ou de faire trop travailler les fers de médiocre qualité par rapport à leur résistance absolue.

Le membre ne pense pas, jusqu'à preuve contraire, qu'en Angleterre on ait construit de ponts aussi économiquement qu'en France. L'opinant est fort partisan de la liberté la plus absolue ; il croit cependant qu'on peut discuter le cas où l'administration refuserait cette liberté ; il faut donc démontrer que la limite imposée par l'administration est irrationnelle et ne satisfait pas la sécurite publique.

Ainsi, soit un pont adjugé. Le concessionnaire doit présenter avec son projet une note de calculs qui indiquent la tension à laquelle les câbles seront soumis et la section qui en résultera suivant que l'on emploiera du fer en fil, en lame ou en barre. Après l'exécution, l'administration vérifie si réellement la section indiquée est en place, mais elle est indifférente sur la qualité des matériaux. Que cette section soit en fer qui porte 80 ou 40 kilog. par mm. q., c'est absolument la même chose. Elle réclame 18 kilog. par mm. q. au moment de l'essai ; si on les lui donne, elle est satisfaite.

Il y a donc lieu, si l'on n'abandonne pas ces limites imposées, et faute de liberté absolue, de modifier les conditions imposées, et de tenir compte de la qualité du fer employé.

UN MEMBRE signale les différences qui existent entre le mode de concession des travaux publics, comme les ponts suspendus, en France et en Angleterre, et demande si ces différences n'expliqueraient pas la solidité plus grande que peuvent offrir les ponts anglais. Dans ce pays, les concessions sont perpétuelles, et les entrepreneurs effectivement responsables ; les tarifs de péage sont plus élevés, et le prix des matériaux plus bas qu'en France. Il ressort de cet état de choses un intérêt évident à faire très solide, à employer les meilleures matières, les sytèmes les plus perfectionnés ; en dût-il résulter une dépense de premier établissement plus forte, elle est plus que compensée par l'économie d'entretien et par la perpétuité des concessions. Un système tout contraire, celui des adjudications au rabais et des courtes concessions, a prévalu en France ; il a eu pour résultat de faire apporter la plus grande économie dans les constructions et dans le choix des ma-

tières; puis l'administration est intervenue avec ses règles, avec ses procès-verbaux de réception, et elle a diminué ainsi la responsabilité des entrepreneurs. Les habitudes sont tellement enracinées maintenant en France, que la plus grande prudence doit présider aux modifications à apporter à la règlementation.

Le même membre présente ensuite plusieurs considérations techniques. Il pense que l'on devrait limiter la flèche que peut prendre le tablier d'un pont suspendu quand il est soumis au passage d'une charge d'épreuve donnée. Il croit également que, dans les grands centres de population comme Paris, on devrait prohiber entièrement des constructions aussi légères et d'une résistance aussi limitée que les ponts suspendus, parce que la circulation est non seulement très grande, mais très variable et presque impossible à calculer *a priori*. L'ouverture de rues nouvelles, la suppression des péages, suffisent pour décupler la circulation sur un pont, et mettre en défaut tous les calculs faits pour servir de base à sa construction.

LE RAPPORTEUR déclare que la commission partage l'opinion qui vient d'être émise au sujet des inconvénients que présentent les ponts suspendus dans les grandes villes et qu'elle l'a formulée dans son rapport.

UN MEMBRE. La liberté dont jouissent les constructeurs anglais a permis aux ingénieurs de construire des ponts suspendus comme ceux de Pesth et d'Hungerford, avec du fer marchand portant des têtes renflées, non pas soudées, mais obtenues dans des laminoirs dont les cylindres ont de 1 mètre à $1^{m},50$ de diamètre. D'un autre côté, la durée des concessions et les principes constitutifs de la propriété des travaux publics en Angleterre ont fait rechercher par les compagnies les meilleures conditions de stabilité et de longévité pour leurs constructions; leur intérêt privé leur en fait une *loi*, ce qui n'existe pas dans notre pays; et cet intérêt est le même que l'intérêt public, représenté en France par le gouvernement. Si donc on veut obtenir ici les mêmes résultats, il faut avoir recours aux mêmes moyens et se rapprocher de l'organisation anglaise; il faut associer l'intérêt que représente l'état à celui des entrepreneurs, et alors un simple contrôle suffira. Ce contrôle existe déjà en France pour le matériel des chemins de fer, et il garantit pleinement la sécurité publique, tout en laissant aux hommes de l'art une entière liberté dans le choix des systèmes et dans la réalisation de leurs idées. La science ne peut se resserrer dans les étroites limites d'un règlement sans demeurer immobile, sans renoncer à tout progrès. Le règlement de son côté ne peut tout prévoir; il règle l'avenir avec les connaissances restreintes du passé : aussi est-il toujours incomplet, et la confiance qu'il inspire ne donne au public qu'une sécurité tout à la fois trompeuse et dangereuse.

M. LE RAPPORTEUR. Les bases nouvelles indiquées par la commission pour les coefficients du travail des fers est une amélioration importante des règles appliquées actuellement par l'état.

UN MEMBRE présente des observations sur l'ordre à suivre pour la discussion. Il serait bon, suivant lui, d'examiner la question des ponts suspendus dans tous ses détails, d'abord au point de vue de l'art, ensuite au point de vue de la règlementation, et, sous ce dernier rapport, il serait essentiel de savoir exactement ce qui se fait dans les pays étrangers.

Comme question d'art, tout le monde est à peu près d'accord sur *le poids*

que peut supporter le fer en barre; mais il n'en est pas de même à l'égard du fil de fer, pour lequel il faut considérer, non seulement la force de résistance et l'élasticité au moment de l'emploi, mais les altérations qu'il peut subir avec le temps sous diverses influences, et notamment celle de l'oxydation. C'est probablement en prévision des changements que le temps amène dans les qualités et la contexture du fer à l'état de fil, que l'administration a fixé le coefficient maximum de 18 kilog.; il serait important de vérifier par des expériences ce qu'il en est à cet égard pour éclairer l'industrie et les hommes de l'art, aussi bien que l'administration.

UN MEMBRE appuie l'opinion qui vient d'être émise. La question a une haute gravité et doit être discutée avec méthode. Examinons d'abord ce qui est relatif à la résistance du fer, indépendamment de toute réglementation; nous consacrerons ensuite une séance spéciale et un chapitre particulier à la comparaison des deux systèmes : la réglementation préventive, absolue, et la liberté soumise à un contrôle et à une surveillance.

LE RAPPORTEUR. C'est ainsi que la commission a procédé dans son rapport.

UN MEMBRE. On ne peut ajourner l'examen de la réglementation : elle revient à chaque instant; il n'est pas un chapitre du rapport où elle ne soit soulevée. Il faut donc avant tout se mettre d'accord sur ce point essentiel, qui est la véritable base du rapport.

L'ordre de discussion proposé est vicieux; nous avons à déterminer le meilleur système de pont, et non pas à fixer les conditions de sécurité à demander à chaque système.

SÉANCE DU 21 MARS 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

ANALYSE DES TRAVAUX DE L'INSTITUT DES INGÉNIEURS CIVILS DE LONDRES.

Construction du Palais de cristal.

Le rapporteur indique d'une manière générale tout l'intérêt qui s'attache aux séances de l'Institut de Londres, qui compte parmi ses membres des ingénieurs du plus grand mérite, engagés dans des travaux considérables, et apportant dans la discussion le fruit de leurs observations et d'une longue expérience; il aborde ensuite le compte-rendu de trois séances de l'Institut,

qui ont été exclusivement consacrées à la lecture d'un rapport et à des discussions pleines d'intérêt sur la construction des bâtiments de la grande exposition des produits de l'industrie.

Le rapport de M. Wyatt, lu à la première séance, donne une description complète du *Cristal palace*. Ce monument, dont les principales dispositions ont été indiquées par M. Paxton, a été élevé dans *Hyde Park* par les soins de MM. Fox, Anderson et compagnie. Il se compose d'une nef de 21^{m}.60 de largeur sur 19^{m}.20 de hauteur, à laquelle se rattachent 8 ailes latérales, dont 2 de 14^{m}.40 et 6 de 7^{m}.20 de largeur, dont les hauteurs respectives sont de 12^{m}.90 et 6^{m}.90.

Le bâtiment est traversé par une galerie de 122^{m}.40 de long, 21^{m}.60 de largeur et 30^{m} de hauteur, couverte par un comble demi-circulaire dont les naissances sont à 18^{m}.40 du sol.

La surface totale du rez-de-chaussée est de 69,350^{mq}.56 ; celle des galeries supérieures est de 19,530^{mq}.

M. Digby Wyatt entre dans tous les détails de la construction, depuis les massifs de béton qui supportent les colonnes, les poutres armées qui soutiennent les galeries, les fermes de la toiture, les gouttières, etc., etc., jusqu'aux dispositions adoptées pour l'écoulement des eaux de pluie, la ventilation, l'extinction des incendies, l'alimentation des fontaines, et enfin pour l'essai des principales pièces qui entrent dans la composition du bâtiment.

Cette construction a été exécutée avec une rapidité presque fabuleuse, grâce à tous les appareils mécaniques que l'on a employés pour économiser la main-d'œuvre, tels que machines à faire les châssis, les gouttières, à couper le verre, à peindre, etc., etc.

La discussion a commencé à la séance suivante. Le projet exécuté a été attaqué à différents points de vue.

La construction, a-t-on dit, serait fortement endommagée par les grands vents, et au lieu d'essayer les poutres séparément, comme on l'a fait, on aurait dû éprouver toute la couverture en même temps, ainsi que cela a été pratiqué pour celle de la station du chemin de fer à Liverpool, à laquelle on a suspendu des poids d'un effet équivalent à celui qui serait dû à une pression de 250^{k} par mètre carré exercée par un grand vent. Les assemblages des poutres avec les colonnes seraient trop faibles, et sujets à se rompre; les massifs de béton qui composent la fondation seraient insuffisants ; les colonnes de 0^{m}.20 de diamètre, d'une épaisseur variable entre 0^{m}.028 et 0^{m}.012, et coulées en 7 morceaux, seraient trop faibles, et sans stabilité pour une aussi grande élévation que celle de 19^{m}.20; les poutres armées des galeries ne résisteraient pas à l'action de roulement occasionnée par la foule se portant en masse dans une même direction ; le verre employé, qui a 0^{m}.003 d'épaisseur, et pèse 6^{k}.60 par mètre carré, ne résisterait ni à la grêle ni au poids de la neige; enfin, la condensation des vapeurs sur ces masses de fonte et de fer viendrait abîmer les marchandises, tandis que la quantité de bois employée, et la disposition même du bâtiment, favoriseraient beaucoup l'action d'un incendie.

A ces différentes objections, il a été répondu que toutes les parties de la construction avaient été l'objet des soins les plus attentifs et des expériences les plus minutieuses. Ainsi, la fondation de béton a parfaitement résisté à

une épreuve de 7^{k}.90 par millimètre carré, tandis que la charge réelle, en supposant le bâtiment rempli de monde, et 0^{m}.60 de neige sur les toits, ne sera que de 2^{k}.82 sur la même surface; les colonnes ont été soumises à des épreuves analogues, et il en résulte que la charge de rupture dépasse 300 tonnes, tandis que le plus fort poids qu'elles puissent jamais avoir à supporter ne dépassera pas 60 tonnes; une expérience de douze années a déjà prouvé que les verres employés étaient d'une force suffisante, et ils seront d'ailleurs protégés par des toiles, qui auront encore pour effet de tempérer les rayons du soleil et de favoriser la ventilation.

Cette importante discussion a continué dans une troisième séance de l'Institut, et plusieurs des objections précédentes ont été reproduites. Le bâtiment résisterait sans doute à tous les efforts verticaux qui pourraient se produire; mais il n'en serait pas de même pour une pression latérale exercée par le vent à raison de 125^{k} par mètre carré. Il présente l'application la plus étendue d'une construction purement rectangulaire; mais, comme il ne possède pas les forts pignons en maçonnerie des filatures du Lancashire, qui sont aussi des constructions rectangulaires composées de colonnes et de poutres, sa stabilité dépend uniquement de l'assemblage des colonnes et des poutres. Ces assemblages étant faibles, les colonnes, qui ne sont pas suffisamment rattachées au sol, peuvent prendre un mouvement de roulement qu'il serait prudent de prévenir par de fortes pièces placées en diagonale. Enfin, la grande quantité de lumière admise par un toit tout en verre nuira aux étalages, et l'on ajoute qu'une couverture en ardoises eût mieux satisfait aux conditions générales à remplir.

Ces objections ont été fortement combattues, et les partisans du système adopté sont entrés dans des explications détaillées pour montrer que les assemblages étaient suffisamment solides, non seulement pour porter les poutres, mais encore pour résister à tout effort accidentel résultant de la rupture de quelques autres pièces voisines, ainsi que d'ailleurs l'expérience l'a prouvé dans le cours de la construction.

A l'égard du verre, les résultats d'une expérience incontestable ont été de nouveau invoqués.

Un membre a ensuite proposé de prévenir l'incendie des toiles de la toiture, en les préparant suivant le procédé de M. Burnett.

La discussion s'est terminée à ce point, et dans le résumé qui en a été fait, il a été nettement déclaré que l'Institut des ingénieurs n'était nullement responsable de l'expression de certaines opinions individuelles, la discussion ayant simplement pour objet d'étudier les faits, dont chaque auditeur devait déduire ses propres conclusions.

Dans une prochaine séance, le rapporteur fera connaître la suite des travaux les plus récents de l'Institut de Londres et résumera notamment la discussion qui s'est élevée au sujet des divers systèmes de ventilation des mines.

REPRISE DE LA DISCUSSION SUR LES PONTS SUSPENDUS.

M. LE RAPPORTEUR rappelle que la question à discuter est celle de la charge à faire supporter par les chaînes des ponts suspendus. Le gouverne-

ment impose aujourd'hui les coefficients de 18 k. pour le fil de fer, de 14 kil. pour les lames et de 12 k. pour les barres. La commission a constaté que l'adoption de ces bases de résistance avait eu des résultats absolument contraires à ceux espérés ; elle croit que l'on donnerait des garanties beaucoup plus réelles aux intérêts publics et privés en fixant au tiers de la charge de rupture l'effort *minimum* à faire supporter aux câbles.

UN MEMBRE regarde le coefficient du tiers comme trop élevé. Il pense qu'au delà du quart le fil de fer s'allonge et perd de son élasticité. Il ne faut pas oublier non plus que la durée des concessions est l'un des éléments essentiels du calcul à faire. Plus la concession est longue, moins on fait travailler les câbles de suspension.

UN MEMBRE. Dans la construction des ponts de Fribourg et de Tournon, on a fait supporter 30 kilog. par mill. q. de section aux câbles en fil de fer, et après 25 à 30 ans de service, le métal n'avait rien perdu de ses qualités. Les 30 kilog. par mill. q. n'ont chargé les câbles qu'au moment des épreuves, c'est-à-dire pendant vingt-quatre heures seulement, tandis que leur service ordinaire n'excède pas 6 kilog. On a essayé dernièrement des brins de fil provenant du pont de Tournon, et il a été reconnu qu'ils n'avaient perdu qu'un kilog. de résistance après vingt-quatre ans de service.

M. LE RAPPORTEUR. Les câbles du pont de Fribourg ont été calculés au tiers de la charge de rupture ; ceux du pont de Tournon au quart, et dans les deux cas, comme dans celui du pont de la Basse-Chaîne, les fers ont très peu perdu de leur résistance primitive. Il n'y a donc pas de conclusion bien précise à tirer de ces exemples. La commission avait d'abord adopté le coefficient du quart ; elle est revenue ensuite à celui du tiers, sur les observations qui lui ont été faites, que le premier chiffre était trop rigoureux.

UN MEMBRE. Le coefficient du tiers est admissible à la condition que tous les éléments constitutifs des câbles seront également intéressés dans les efforts à subir, mais il n'en est pas ainsi dans la pratique. Pour les câbles en fil, par exemple, la charge n'est jamais égale pour tous les brins ; il y a des fils qui travaillent beaucoup : ceux-là souffrent davantage que les autres, et, bien que ceux-ci se conservent très bien, ils sont brisés lorsque les autres viennent à se rompre par suite de leur usure exceptionnelle. Il n'est donc pas prudent, avec des éventualités semblables, d'admettre le coefficient du tiers.

Si, au lieu de câbles en fil, il s'agit de câbles en lames, on se trouve en présence d'inconvénients d'une autre nature et de nombreuses causes d'inégalité de charge. Il y a des soudures plus ou moins bien faites, de nombreux boulons, et des assemblages qui ne travaillent pas tous. Les épreuves que l'on fait subir à ces ponts ne sont donc pas concluantes.

En résumé, il peut être dangereux d'adopter le coefficient du tiers, et la prudence invite à ne pas excéder celui du quart.

UN MEMBRE. Il n'y aurait aucun inconvénient à approcher, autant que possible, dans les épreuves, de la limite de résistance absolue, puisque le fer éprouvé à 30 kilog. n'en porte régulièrement que 6 : cela obligerait à ne prendre que de très bons matériaux et à les employer le mieux possible, à choisir les meilleurs systèmes, à faire des constructions très solides, etc. ; car tout se tient dans les ouvrages de cette nature, et plus l'épreuve des câ-

bles sera sérieuse, plus les maçonneries, les pièces d'attache et les assemblages présenteront de garanties de sécurité.

Aujourd'hui on ne se préoccupe que d'une seule chose, l'épreuve des câbles ; tout le reste est négligé : aussi tous les calculs sont-ils faits au point de vue unique du succès de cette épreuve. Pour réduire la charge, on diminue la force des tabliers, celle des garde-corps, et l'on arrive à faire des ponts qui manquent de solidité et de stabilité. Ce système est vicieux. Au lieu de pousser les constructeurs à faire des ponts légers, il faut trouver le moyen de mettre leur intérêt d'accord avec l'emploi du meilleur métal, travaillant plus également et avec des tabliers aussi rigides que possible.

UN MEMBRE. La charge permanente à faire supporter aux câbles doit être généralement fixée au delà du tiers de la charge de rupture, soit qu'il s'agisse de ponts en lames ou en barres, parce que, dans ce cas, les pièces auxiliaires de suspension sont très lourdes, ce qui ne permet pas d'atteindre à de grandes portées ; soit qu'il s'agisse de ponts en fil, parce que ce système a pour lui tous les avantages d'une économie considérable. Toutefois on pourrait admettre un coefficient variable suivant les systèmes et les portées des ponts.

M. LE RAPPORTEUR fait observer qu'outre les charges permanentes, un pont peut être soumis, dans certains cas, à l'action de forces vives, telles que la rupture d'un essieu de voiture ou le passage d'un grand nombre d'hommes marchant au pas. Il y aurait donc imprudence à admettre que les ponts peuvent être éprouvés à la moitié de la charge de rupture. Dans les bâtiments, où le fer employé en tirants n'est soumis ni à des efforts accidentels ni à des vibrations, on est loin d'adopter la proportion de moitié. Pour les ponts, le coefficient du tiers peut être appliqué aux fils qui résistent à 75 kilog.; mais, pour ceux qui rompent à 60 kilog., le coefficient du quart doit être exigé ; on arriverait ainsi à proportionner les coefficients à la qualité des fils employés.

UN MEMBRE. Dans les circonstances ordinaires, les fils n'ont pas à supporter plus de 6 kilog. ; on peut donc adopter d'une manière générale le coefficient du tiers.

UN MEMBRE. Pour arriver à une solution, il faut se rendre compte de ce que l'on veut. Deux systèmes sont en présence : les ponts légers et peu coûteux, comme en France ; les ponts en fer marchand, plus lourds, mais très solides et très durables, comme ceux d'Angleterre. Il faut encourager l'établissement de chacun de ces ponts, et laisser ensuite les entrepreneurs choisir entre les différents systèmes.

Les ponts légers sont économiques, mais manquent de stabilité ; il faut leur en donner en prescrivant des essais distincts pour les fils, les câbles isolés, les câbles réunis, les maçonneries, en un mot pour les diverses parties constitutives de ce genre de construction, et en accordant des coefficients d'autant plus élevés que les entrepreneurs se soumettront à des épreuves plus multipliées.

Les ponts en fer marchand offrent des garanties sérieuses de stabilité, attendu que les charges accidentelles sont très peu de chose relativement au poids même des ponts. Les exemples que l'Angleterre fournit prouvent que l'on peut, avec toute sécurité, faire usage de ce système, même dans l'in-

térieur des villes les plus peuplées. La commission a donc eu tort de condamner d'une manière générale l'établissement des ponts suspendus dans l'intérieur des grandes villes, puisqu'il est possible de leur donner toutes les conditions désirables de solidité.

En résumé, les chiffres que propose la commission reposent sur une donnée exclusive en faveur de l'emploi du fil de fer; il convient de l'inviter à suivre une série d'épreuves et d'expériences sur la résistance des fers dans les différentes conditions de leur emploi. Le résultat de ces expériences donnera à ces propositions une base sérieuse sur laquelle il sera possible de discuter utilement.

UN MEMBRE critique le système qui consisterait à établir des tabliers très lourds, dans le but unique d'accroître la stabilité de la construction, cette surcharge permanente fatiguant inutilement les câbles et diminuant leur force disponible pour résister aux charges accidentelles; mais il est d'avis que l'on peut arriver au même résultat en augmentant la rigidité des tabliers.

Le système suivi en Angleterre ne convient pas à la France, en raison de la différence du prix des fers. Le pont de Menai, composé de soixante-quatre chaînes, est d'un aspect disgracieux et d'un poids excessif; en France il serait revenu à un prix énorme. Les câbles en fil de fer eussent donné une résistance égale avec un poids beaucoup moindre et une économie considérable; ce système eût donc été préféré avec raison.

Il ne faut pas oublier, d'ailleurs, cette circonstance essentielle que les oscillations sont indépendantes du poids des chaînes, et que, dès lors, il n'y a nul avantage, sous ce rapport, à employer des lames ou des barres, dont les têtes renflées, les boulons, les assemblages, ajoutent à la charge sans accroître la force ni diminuer les mouvements horizontaux ou verticaux.

UN MEMBRE. Il faut envisager la question indépendamment des matériaux employés. Les charges passagères sont trop faibles par rapport aux charges permanentes pour que l'on doive s'en préoccuper. Plus les câbles de suspension sont forts et plus le tablier doit être lourd, plus la construction sera solide; elle sera dès lors très peu affectée par une charge passagère quelconque, la charge permanente étant, dans tous les cas, beaucoup plus considérable.

UN MEMBRE entend le système adopté pour la construction du pont de Menai. On oublie que ce pont est jeté sur un détroit dans lequel soufflent des vents d'une grande violence; les ingénieurs ont adopté, en conséquence, pour cet ouvrage comme pour les nouveaux ponts tubulaires qui leur font tant d'honneur, un système basé sur ce principe que les ponts exposés à de grands efforts doivent résister par leur masses, et y trouver, comme élément de solidité et de stabilité, l'absence d'oscillations et de vibrations destructives.

Dans ces conditions, on peut très bien élever le coefficient; mais il n'en est pas de même avec le système des constructions légères, incapable de résister sans déformation et sans fortes oscillations aux efforts permanents ou accidentels qu'elles peuvent avoir à supporter.

UN MEMBRE reconnaît les avantages des masses comme éléments de résis-

tance et de stabilité ; mais il ne croit pas que les masses doivent être dans les chaînes.

UN MEMBRE expose les résultats consignés dans le dernier n° des *Annales des ponts et chaussées* : c'est que le fer marchand ne subissait aucune altération jusqu'à la moitié du poids de rupture ; dans les fils, l'allongement arrive plus tôt ; c'est une question de fabrication, d'écrouissage. La commission doit recueillir et étudier tous ces faits et les faire connaître.

M. LE RAPPORTEUR propose d'ajourner la question des coefficients, afin de donner le temps à la commission de se procurer des renseignements précis, et de discuter, en attendant, les chapitres qui suivent.

Cette proposition est adoptée.

SÉANCE DU 4 AVRIL 1851.

Présidence de M. A. PERDONNET.

M. Yvon Villarceau ayant communiqué, dans deux séances précédentes, des recherches mathématiques sur la théorie de la stabilité des machines locomotives en mouvement, et plusieurs de ses observations tendant à infirmer quelques unes des conclusions d'un travail sur le même sujet publié en 1849 par M. Lechatellier, ingénieur des mines, et développé par lui l'année dernière dans le sein de la Société des ingénieurs civils, la discussion est ouverte de nouveau sur cette importante question.

M. LECHATELLIER, qui assiste à la séance, donne lecture d'une note en réponse aux deux mémoires présentés par M. Yvon Villarceau.

Son intention, en publiant, il y a deux ans, le résultat de ses recherches sur les causes de l'instabilité des machines locomotives et sur les moyens de les détruire, n'a pas été de donner une théorie complète des principes de la stabilité des machines, mais seulement d'indiquer un moyen pratique de faire disparaître les mouvements anormaux qui se produisent dans la marche des locomotives. Ce procédé étant donné et son exactitude confirmée par l'expérience faite sur plus de trois cents machines réglées d'après le système des contre-poids, il restait à le vérifier à l'aide de la théorie scientifique. Ce travail, M. Yvon Villarceau s'en est chargé, et sur beaucoup de points il s'est trouvé d'accord avec M. Lechatellier ; toutefois, il en est d'autres sur lesquels il a signalé des différences qui rendent nécessaire une nouvelle discussion.

Ainsi, dans les machines à six roues couplées, M. Yvon Villarceau émet l'avis que le contre-poids des roues d'avant étant placé dans le sens opposé à la manivelle, celui des roues d'arrière doit être placé dans le même sens qu'elles. — M. Lechatellier pense qu'il faut équilibrer chaque roue sé-

parément, en comprenant dans son mouvement celui de tout l'attirail qu'elle porte, ou la part qui lui est afférente dans le mouvement de cet attirail lorsqu'il est commun à plusieurs roues.

L'auteur du procédé n'aperçoit pas, dès lors, l'avantage qu'il y aurait à placer l'un des contre-poids dans le même sens que la manivelle ; il y verrait plutôt des inconvénients, et désirerait que M. Yvon donnât sur ce point des explications plus étendues.

Il ne croit pas non plus qu'il soit possible de remplir une des conditions indiquées par M. Yvon pour équilibrer le mouvement de la bielle dans les machines à roues indépendantes. Il a calculé que, pour satisfaire à cette condition dans la machine du chemin de fer du Nord prise comme exemple, il faudrait prolonger la bielle de 1 mètre au delà du manneton de la manivelle, et lui appliquer une lentille du poids de 400 kilog. Cette disposition ne pourrait pas être appliquée aux machines à cylindres intérieurs, et pour celles dont les cylindres sont placés à l'extérieur, l'avantage que l'on pourrait en retirer ne compenserait pas l'inconvénient qu'elle présenterait, M. Yvon reconnaissant lui-même que les perturbations dont il s'agit n'ont qu'une très faible importance.

Enfin, M. Yvon ayant toujours supposé dans son travail que les cylindres sont horizontaux, il resterait à savoir ce qui devrait être fait, suivant lui, pour les machines à cylindres inclinés.

En résumé, M. Lechatellier n'a pas trouvé dans les considérations exposées par M. Yvon de Villarceau dans son mémoire de motifs suffisants et de raisons déterminantes pour abandonner quant à présent la méthode pratique indiquée par lui pour équilibrer les machines locomotives en mouvement.

M. YVON VILLARCEAU fait précéder sa réponse à la note de M. Lechatellier de la lecture d'une lettre déposée sur le bureau à la fin de la séance précédente, et dans laquelle se trouve traité le cas des machines à cylindres inclinés. Entrant ensuite dans la discussion, il s'occupe d'abord des machines à six roues couplées, et soutient que, pour satisfaire aux équations d'équilibre, les contre-poids des roues d'avant et d'arrière doivent être placés, non pas l'un et l'autre dans le sens opposé à la manivelle, mais l'un dans le même sens et l'autre dans le sens opposé.

Quant au prolongement de la bielle au delà du manneton dans les machines à roues indépendantes, il est possible que cette condition soit difficile à réaliser dans les machines actuelles ; mais cependant ce ne doit pas être là un obstacle invincible, si la disposition est reconnue bonne : il faudra seulement chercher le moyen pratique d'introduire dans ces machines, et surtout dans les nouvelles à construire, des organes produisant les résultats voulus. Mais il persiste à croire que, si l'on se borne à suivre le procédé de M. Lechatellier, on n'arrivera pas à équilibrer complétement les machines locomotives en mouvement.

UN MEMBRE. Jusqu'à présent, le procédé de M. Lechatellier a complétement satisfait les ingénieurs et résolu pratiquement le problème de la manière la plus satisfaisante, puisque les causes perturbatrices de la stabilité des machines locomotives ont disparu.

Dans le règlement des machines tel qu'il est fait maintenant, d'après les

indications de M. Lechatellier, il existe une symétrie complète entre les contre-poids par rapport aux organes afférents à chacun des cylindres, et les résultats obtenus sont excellents. Il faudrait donc produire autre chose que des calculs pour faire abandonner une pratique aussi avantageuse; il faudrait proposer des moyens d'une application facile, dont la supériorité pourrait être démontrée à tous et vérifiée par tous à l'aide des notions de mécanique généralement répandues : or c'est ce que l'on ne fait pas.

La discussion a porté sur deux points principaux : en premier lieu, sur une interprétation d'un passage du mémoire de M. Lechatellier, contraire à celle que tous les ingénieurs lui ont donnée, et surtout à la pratique suivie dans tous les ateliers d'après les conseils de M. Lechatellier; en second lieu, sur la convenance de l'adjonction d'une bielle à contre-poids au delà du manneton de la manivelle. A l'égard de cette proposition, il y a deux choses essentielles à considérer : la possibilité, l'utilité. Quant à la possibilité, elle n'existe pas avec le système actuel des machines locomotives. Cela serait très regrettable, sans doute, si l'adjonction proposée était vraiment nécessaire; mais il n'en est pas ainsi. Que veut-on prévenir? Les effets d'une réaction verticale sur les rails, c'est-à-dire des à-coups que les contre-poids déterminent lorsqu'à chaque tour de roue ils redescendent sur les rails, et, par suite, les méplats qui se produisent sur les bandages, et entraînent leur usure plus rapide aux points correspondants aux contre-poids que dans les autres points. Ces craintes avaient préoccupé les ingénieurs lorsque le nouveau système de règlement des machines a été proposé; mais il a été reconnu par l'expérience qu'elles étaient sans fondement, et que l'usage des contre-poids n'exerçait pas d'influence fâcheuse sur les bandages.

M. YVON croit avoir répondu à toutes les exigences de la pratique et indiqué les moyens d'une application possible. Dans tous les cas, et même en admettant que l'on ne puisse arriver aujourd'hui à équilibrer complétement les machines, il est toujours bon de savoir ce qui reste à faire sous ce rapport, et quelle est l'importance des causes perturbatrices qui subsistent encore, malgré les améliorations introduites dans la construction des machines pour accroître la stabilité. C'est cette différence entre le progrès accompli et la solution complète du problème, c'est-à-dire la stabilité absolue, qu'il a voulu indiquer, et il pense avoir satisfait, sous ce rapport, à toutes les exigences de la question.

UN MEMBRE appuie l'opinion précédemment émise par un de ses collègues sur les résultats de la discussion, et ne croit pas que l'on puisse s'autoriser des différences peu importantes signalées entre les conclusions de la théorie pure et les procédés pratiques fournis à l'industrie des chemins de fer par M. Lechatellier pour rien changer quant à présent au système suivi dans les ateliers pour équilibrer les machines locomotives en mouvement.

SÉANCE DU 18 AVRIL 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

M. LE PRÉSIDENT donne lecture d'une lettre de M. Lechatelier, dans laquelle celui-ci rectifie une erreur qui a été commise dans le dernier compte-rendu relativement au prolongement de la bielle au delà du manneton de la manivelle. C'est à un prolongement de $0^m,50$ que correspond une lentille de 400 kilog., et non pas à un prolongement de 1^m. Dans ce cas, la lentille ne devrait peser que 215 kilog. M. Lechatelier ajoute qu'il a cherché à faire une application simple, et que, pour y arriver, il a fait bon marché de toutes les conditions qui pouvaient être négligées sans inconvénient grave; il ne s'est pas montré difficile sur les moyens à employer, parce qu'ils n'avaient pour objet que de le conduire à des résultats d'expérience nécessaires pour confirmer la valeur de son procédé. M. Yvon Villarceau, dit M. Lechatelier, a fait une théorie très complète et qui ne laisse rien à désirer comme théorie; la discussion ne doit donc avoir lieu que sur les procédés matériels à employer dans les ateliers pour arriver au résultat cherché. Il reste convaincu que, lorsque M. Yvon déduira de ses formules les moyens d'application réellement pratiques qu'elles comportent, il arrivera exactement au même résultat que lui, obligé qu'il sera de négliger après coup ce que M. Lechatelier a négligé lui-même *a priori* pour satisfaire aux nécessités de la construction.

Il est ensuite donné lecture d'une lettre de M. Yvon, dans laquelle celui-ci propose de rectifier, en ce qui le concerne, le compte-rendu de la séance du 4 avril; car, à la lecture de ce compte-rendu, beaucoup de personnes ont pu se figurer qu'il avait entrepris de vérifier les règles pratiques proposées par M. Lechatelier. Cette manière d'envisager son travail serait inexacte. Il a abordé la question de stabilité des locomotives en mouvement sans se préoccuper des travaux de M. Lechatelier et autres ingénieurs sur cette matière. Il a retrouvé de son côté les conditions indiquées par ces ingénieurs; mais il en fait connaître plusieurs autres entièrement nouvelles et qui ne sont pas sans importance. Malgré les incontestables avantages que la pratique a obtenus chez nous de l'application des contre-poids de M. Lechatelier aux machines locomotives, il subsiste cependant des effets fâcheux. Les bandages des roues motrices présentent, en une région de leur contour, des flaches dont la profondeur atteint souvent 5 à 6 millimètres, et en moyenne 3 à 4 millimètres, après un parcours de 25,000 kilomètres, environ. Ce sont, entre autres, ces effets dont il s'agit de diminuer l'intensité en satisfaisant d'une manière plus ou moins complète à l'ensemble des conditions de la stabilité. Tout le monde étant d'accord sur ce que les règles de M. Le-

chatelier ne satisfont pas complétement à l'ensemble des conditions de stabilité, et celles-ci se trouvant fixées par la théorie de M. Yvon, abstraction faite des difficultés de la réalisation, il ne reste plus évidemment qu'à rechercher le système pratique qui approche le plus de la solution complète.

Jusqu'ici il n'a encore rien communiqué qui se rattache à cette transition; mais il se propose de présenter prochainement à la Société un projet (basé sur sa théorie) d'expériences rationnelles sans lesquelles il est actuellement impossible de déterminer les conditions de stabilité les plus avantageuses au point de vue de la dépense de combustible, de l'entretien et de la réparation des locomotives.

M. Yvon fait remarquer que les calculs contenus dans la lettre de M. Lechatelier sont relatifs à une question sur laquelle ils sont tombés d'accord, après les explications de M. Lechatelier relativement à l'interprétation d'un passage de son ouvrage sur la situation des boutons des manivelles et des contre-poids.

TRAVAUX DE L'INSTITUT DES INGÉNIEURS CIVILS DE LONDRES. AÉRAGE DES MINES.

UN MEMBRE obtient ensuite la parole pour faire connaître à la Société le résumé de plusieurs séances de l'Institut des ingénieurs civils de Londres, dans lesquelles on a discuté les meilleurs moyens à employer pour éviter les accidents qui se déclarent si souvent dans les mines. Voici ce résumé :

Dans la séance du 12 novembre 1850, M. William-Vest, de Leeds, a lu un mémoire sur l'exploitation des mines de charbon. Ce mémoire présente une analyse raisonnée des rapports de Faraday, de la Bêche Playfair et autres, d'où il résulte que les mines en général, et même celles qui passent pour les plus sûres, tendent à devenir dangereuses et exigent que l'attention soit éveillée sur les différents genres de précautions à prendre.

Différentes considérations sont présentées à ce sujet, et l'on signale l'intention du gouvernement d'établir des inspecteurs des mines, non pas pour que leur contrôle diminue en quoi que ce soit la responsabilité des ingénieurs et des directeurs, mais parce qu'on veut prouver qu'en établissant des rapports plus réguliers entre les différents districts, il en résultera une adoption plus générale des moyens de sécurité qui auraient déjà produit de bons résultats dans certaines exploitations.

La profondeur des mines paraît être sans influence déterminante sur les accidents. Il faut plutôt chercher la cause de ceux-ci dans la prédisposition de certaines couches de charbon à émettre des gaz carburés, bien que cependant certaines mines qui se présentent dans des conditions assez favorables aient été le théâtre de nombreuses explosions : celle de Farrost, par exemple, a eu, dans un espace de 28 ans, six explosions, qui ont coûté la vie à 140 personnes.

Dans certains cas, les plus fatales explosions n'ont pas été empêchées par une ventilation en général convenable; il est résulté, par des exemples d'enquêtes ouvertes après les accidents des mines de Haswelt et de Jarrast, que la ventilation était parfaite. Dans ces circonstances, le mal est venu, non

pas du défaut d'air, mais plutôt de la difficulté de le faire circuler dans toutes les parties de la mine, de manière à chasser tous les gaz qui se produisent.

L'accumulation du gaz dans les cavités du toit, sa soudaine irruption par suite des chutes qui se produisent dans les anciens travaux, et l'usage des lampes sans grillage, sont, en définitive, les causes les plus ordinaires des explosions. Parmi les précautions à prendre, on signale l'abandon des puits à cloisons, la nécessité d'avoir dans chaque exploitation au moins deux puits placés à des distances telles, que, en cas d'explosion, l'un des deux reste toujours praticable, et la convenance de diriger une partie de l'air dans les puits de sortie à une certaine hauteur au dessus des foyers de ventilation; enfin la discussion se porte sur les précautions à prendre pour assurer la constante action des appareils de ventilation pour évacuer l'air vicié.

On signale avec regret la témérité et le manque de précaution des ouvriers; mais on indique la nécessité de tirer parti de leurs qualités réelles par l'éducation et le bon exemple, et, dans ce cas, la connaissance exacte des dangers qu'ils affrontent en manquant aux règlements établis dans les mines, et l'instinct naturel de leur conservation, seront leur meilleure sauve-garde contre les accidents. On insiste enfin très énergiquement sur la nécessité d'instruire et de perfectionner les ouvriers, et l'on présente ce moyen comme devant conduire beaucoup plus sûrement à la sécurité des exploitations que toute une armée d'inspecteurs du gouvernement.

Dans la séance du 19 novembre 1850, M. Villiam Price Struvé, de Swansea, lit un mémoire sur la ventilation des houillères, envisagée au double point de vue de la théorie et de la pratique.

L'auteur commence par montrer que les principes généraux qui doivent régir la ventilation des houillères sont :

1° Qu'il suffit, dans la plupart des cas, de donner une vitesse de $1^{m}.50$ par seconde au courant qui traverse les galeries;

2° Qu'au delà de cette vitesse, il en résulte des pertes et des inconvénients;

3° Que, pour obtenir une quantité d'air frais suffisante, il faut donner une section convenable au passage d'air.

En aménageant l'exploitation d'une mine de manière à répartir les travaux sur beaucoup de points, pour diviser le courant d'air, ou en le partageant en plusieurs conduits qui alimentent séparément les différents chantiers, et, en s'arrangeant d'ailleurs pour élargir la conduite d'air et en réduire la longueur totale, il est facile de faire passer dans une exploitation 8^{mc} d'air par minute et par homme.

La rapidité du courant d'air dans une mine peut être affectée par beaucoup de causes, qu'il importe de signaler, et l'une des plus fréquentes consiste dans les pertes d'air qui ont lieu par les anciens travaux qui ne sont pas entièrement comblés, et par les dérangements qui se produisent dans la stratification naturelle des couches. Ainsi, dans deux expériences faites avec le ventilateur de M. Struvé, il a été prouvé que l'air aspiré ne descendait pas par l'un des puits pour traverser les travaux existants, mais provenait, au contraire, en grande partie, des chambres existant dans les anciens travaux ou créées naturellement par les éboulements qui avaient eu lieu aux en-

virons de la mine. — Dans ces différents cas, l'élargissement des passages d'air, de manière à réduire sa vitesse à $0^{m}.90$ ou $1^{m}.20$ par seconde, aurait produit les meilleurs résultats.

Ces principes ont été perdus dans la plupart des exploitations, où l'on s'est fié uniquement au tirage des foyers pour déterminer la ventilation. Dans quelques cas même, on s'en rapporte à l'accroissement de température produit dans la mine par la lumière et la respiration des hommes, aidée par l'effet du refroidissement de l'eau qui dégoutte dans le puits. Ceci suffit à peine pour produire, pendant l'hiver, une différence de température de 13 degrés entre les deux puits, tandis que, pendant l'été, cette différence est souvent nulle, et la ventilation se trouve presque annihilée.

Là où l'on emploie les foyers, la température dans le puits de sortie varie de 90 à 160 degrés, résultat fort avantageux pour la ventilation, mais nuisible pour le puits lui-même, et fort dangereux pour les ouvriers qui le traversent.

La comparaison des dimensions des passages d'air et de sa vitesse dans un grand nombre d'exploitations a conduit M. Struvé à l'estimation de la force employée dans les mines les mieux ventilées dans le cas où l'on emploierait une machine à vapeur et des pompes à air : cette force serait de 23 à 26 chevaux.

L'auteur cite aussi dans son mémoire les expériences de MM. Nicholas Wood, Elliot, Vivian et autres ingénieurs des mines, pour prouver l'insuffisance de l'emploi d'un jet de vapeur pour produire la ventilation, et il prouve que c'est ici une mauvaise application de la puissance de la vapeur, surtout en la comparant à la force nécessaire pour faire fonctionner le ventilateur qu'il a établi dans les houillères d'Englesbush. Cet appareil (1) se compose de deux pistons creux assez semblables à de grands gazomètres, et portant des soupapes d'entrée et de sortie. Ces pistons se meuvent dans un réservoir d'eau, et reçoivent un mouvement alternatif d'une petite machine de 5 chevaux. Les effets de ce ventilateur ont dépassé tout ce qui avait été fait comme ventilation jusqu'à ce moment.

Dans les deux séances des 26 novembre et 3 décembre 1851, on signale les avantages de la division des courants d'air pour réduire sa vitesse et ventiler convenablement les points les plus reculés de l'exploitation, et l'on appuie sur les inconvénients de la haute température qu'il faut avoir dans les puits de sortie d'air lorsque l'on emploie les foyers de ventilation. Le peu de force employé par l'appareil de M. Struvé, comparativement à l'usage du jet de vapeur, milite fortement en sa faveur, et parmi ses avantages on signale encore celui-ci, c'est que l'on s'aperçoit de suite des obstacles imprévus qui peuvent arrêter la circulation de l'air dans la mine, parce que la machine s'arrête naturellement par l'effet de la résistance que rencontre le courant d'air.

On cite l'usage des foyers comme produisant de très bons effets dans les mines du Nord, et l'on présente le danger résultant de l'inflammation des gaz au contact des foyers comme plus idéal que réel; mais on reconnaît ce-

(1) L'invention remonte à 1846.

pendant que l'emploi d'un moyen mécanique simple et efficace mérite toute l'attention des exploitants. On a essayé les ventilateurs à force centrifuge pour envoyer de l'air neuf dans les travaux, mais ils employaient trop de force.

Les difficultés rencontrées jusqu'ici dans l'usage des moyens mécaniques paraissent avoir tenu à la trop faible dimension des soupapes; il faut les faire très grandes, fort légères, et l'on peut diminuer ainsi d'une manière considérable la puissance des moteurs. Des machines construites sur le même principe que celles de M. Struvé ont alors donné de meilleurs résultats pour la ventilation des hôpitaux, des navires d'émigrants, etc.

Quelques orateurs, tout en reconnaissant l'importance des grands passages d'air à grande section, préfèrent la ventilation naturelle à la ventilation mécanique, lorsque, toutefois, l'exploitation de la mine peut être disposée pour obtenir cet effet; dans le cas contraire, le ventilateur de M. Struvé leur paraît être un excellent appareil. On insiste de nouveau sur la nécessité d'avoir toujours deux puits dans une exploitation, dont l'un aboutit aux travaux les plus profonds, et l'autre aux travaux supérieurs, de manière que les gaz ne puissent jamais s'accumuler dans la mine.

Les partisans du jet de vapeur signalent son efficacité dans certains cas et sa supériorité sur les foyers, mais ils ne donnent aucun renseignement sur la dépense qu'entraîne cette méthode.

La séance se termine par un exposé des avantages que présente la ventilation mécanique pour purifier une mine après une explosion : alors il serait très dangereux d'allumer le foyer au fond du puits. Avec la ventilation mécanique, on peut déterminer facilement un courant d'air très rapide, qui purge en très peu de temps tous les travaux des gaz méphitiques qu'ils peuvent contenir.

Enfin, dans la séance du 10 octobre 1850, la discussion continue sur le même sujet.

Les partisans du jet à vapeur reviennent sur cette application, dont un des avantages est de produire un courant continu, sans pulsation aucune; mais, pour en obtenir de bons effets, il faut le faire agir plutôt en bas qu'en haut des puits, et de manière à former un cône de vapeur. Ils citent ensuite quelques houillères où le jet de vapeur produit d'excellents résultats avec une très faible dépense.

Cette opinion est de nouveau combattue. La ventilation mécanique ne produit de pulsations que dans le cas où les soupapes sont lourdes ou trop petites, et les avantages qu'elle présente dans la pratique par son efficacité, par la rapidité de son action, doivent la faire préférer, soit aux foyers, soit à l'usage du jet à vapeur.

Dans le résumé de la discussion, on signale de nouveau le faible effet utile que peut produire la vapeur en l'employant sous la forme d'un jet pour donner le mouvement à une colonne d'air, et l'on établit que, la vitesse convenable à donner au courant d'air dans le puits d'aspiration étant au moins de $5^{m}.40$ par seconde, il faut, pour obtenir cette vitesse, une colonne d'air motrice de $41^{m}.00$, et qu'en employant des foyers ou un jet de vapeur au fond de la mine, ce résultat ne peut pas être obtenu sans élever la température à un degré inapplicable dans des puits cloisonnés ou dans des puits

servant à l'extraction des charbons ou au passage des hommes. On montre ensuite que le jet de vapeur appliqué au sommet du puits, et n'agissant qu'en raréfiant l'air, est trop coûteux pour être généralement employé, tandis qu'en donnant au cylindre de l'appareil de M. Struvé une section égale à celle des passages de l'air dans la mine, il n'exige qu'une force d'un cheval et $0^{m}.85$ par mètre superficiel du puits d'aspiration.

Enfin, il paraît démontré que dans la houillère d'Englesbuch, où l'on emploie cette machine depuis deux ans, la pulsation du courant d'air n'est pas perceptible à plus de 90^{m} de l'appareil, et qu'il ne peut, par conséquent, en résulter aucun inconvénient dans les travaux.

REPRISE DE LA DISCUSSION SUR LES PONTS SUSPENDUS.

L'ordre du jour appelle la suite de la discussion sur la construction des ponts suspendus.

M. LE RAPPORTEUR lit la partie de son travail dans laquelle il indique les moyens généralement employés pour la confection des chaînes en fer forgé, en fil de fer et en lames superposées, ainsi que les dispositions particulières qu'il faut prendre pour l'établissement des tiges verticales. Il indique aussi quelles sont les dispositions qu'il convient de prendre pour garantir de l'oxydation les fers des ponts suspendus.

UN MEMBRE fait remarquer que la construction des chaînes en barres ou fer laminé n'est pas indiquée dans le rapport. Il est vrai, dit-il, qu'en France ce système n'est pas employé; mais, en revanche, il l'est beaucoup en Angleterre. Ce système est préférable à celui des chaînes en fer forgé, dont les soudures ne présentent pas toutes les conditions de solidité désirables, le fer pouvant se brûler à la forge, tandis que, dans le système anglais, les barres plates sortent du laminoir avec la forme voulue pour se prêter à tous les assemblages.

UN MEMBRE. Les chaînes en fil de fer ne doivent pas être condamnées. Leur valeur dépend tout entière du mode de fabrication adopté. Le rapport n'est peut-être pas assez explicite à cet égard, et il eût été désirable qu'il indiquât des conditions techniques de fabrication au moyen desquelles les chaînes en fil peuvent présenter des avantages. On aurait pu recommander, par exemple, la galvanisation préalable des fils comme un moyen d'éviter l'oxydation, et, par suite, l'affaiblissement et la rupture des chaînes.

M. LE RAPPORTEUR répond à ces diverses objections. La commission, dit-il, n'a pas parlé de chaînes en barres laminées, parce qu'elles ne sont pas employées en France. Dans une prochaine réunion, la Commission s'occupera de ce système, qui est employé en Angleterre et en Allemagne.

Quant au mode de fabrication des câbles en fil de fer, la Commission a pensé qu'elle ne devait pas entrer dans des détails qui l'auraient entraînée trop loin, et qui sortiraient du cadre qui lui avait été tracé.

SÉANCE DU 2 MAI.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

STABILITÉ DES LOCOMOTIVES.

M. Yvon Villarceau dépose la quatrième partie de son mémoire sur les conditions de stabilité des locomotives en mouvement. Cette nouvelle communication indique les bases d'un système rationnel d'expériences à entreprendre pour déterminer les conditions les plus favorables à l'application des contre-poids, lorsqu'il y a impossibilité pratique de satisfaire à l'ensemble des conditions théoriques présentées dans les précédents mémoires.

ÉTUDES A FAIRE SUR LE DRAINAGE.

M. CALLA a la parole pour une communication relative aux procédés de drainage.

Conduit à s'occuper de la question du drainage par l'étude d'une machine anglaise employée pour la fabrication de tuyaux en terre dit *drains*, pour l'asséchement des terres humides, M. Calla a pensé qu'il serait convenable d'éveiller à ce sujet l'attention des membres de la Société et d'engager ceux d'entre eux dont le temps est libre à s'occuper d'une question dont l'étude est facile, et pourrait employer d'une manière utile et lucrative ceux qui voudraient s'y adonner.

Le drainage s'applique avec de grands avantages à l'amélioration des sols arables reposant sur un sous-sol imperméable; il consiste dans l'exécution de rigoles formées avec des empierrements recouverts de terre végétale, que l'on cultive pour ne pas perdre de terrain, et destinés à l'écoulement des eaux.

Dans les localités qui ne présentent pas les matériaux nécessaires pour former ces empierrements, on les a remplacés par des tuyaux en terre cuite qui ne joignent qu'imparfaitement.

Ce procédé, établi sur une grande échelle, peut s'appliquer avec succès, non seulement à l'assainissement des pièces de terres particulières, mais même à l'assainissement de contrées tout entières, par l'établissement de canaux et d'un système complet d'épuisement.

C'est principalement sous ce point de vue qu'il est utile de s'en occuper et qu'il serait désirable de voir prospérer les compagnies qui commencent à se former en France à l'imitation des compagnies déjà formées en Angleterre, où le parlement a affecté aux améliorations agricoles une somme de

50 millions, remboursables par annuités, et dont une grande partie a été déjà employée à l'établissement des procédés de drainage.

M. Calla engage ceux des membres de la Société qui en auraient le loisir à étudier cette question, à faire, soit dans le Bulletin de la Société d'encouragement, soit aux sources où il a puisé, toutes les recherches qu'elle comporte, et à les communiquer à la Société; et il est lui-même disposé à le faire, si d'ici à quelque temps il n'a pas été devancé.

PONTS SUSPENDUS.

L'ordre du jour appelle la suite de la discussion sur les ponts suspendus.

M. LE RAPPORTEUR donne lecture de la partie de son rapport relative aux choix à faire parmi les différents systèmes de câbles en fer forgé, en fer laminé, en lames et en fils de fer.

Il conclut à l'emploi des câbles en fils de fer pour les parties extérieures, combinés avec l'emploi de barres d'amarre en fer forgé pour les parties engagées dans les maçonneries, en y joignant la condition que toutes les parties soient établies dans des galeries d'assez grande section pour que le système de suspension puisse être en tout temps visité dans toute son étendue.

UN MEMBRE exprime sa préférence pour les câbles en lames superposées. Il pense qu'il est plus facile d'obtenir avec ce système une tension uniforme qu'avec des câbles en fils, dont les éléments sont soumis à des irrégularités de tension provenant de la dilatation et de l'évasement du faisceau à la rencontre des fléaux.

L'emploi de barres en fer bien corroyé, composées d'un certain nombre de lames superposées, lui paraît excellent, surtout en appliquant les procédés anglais et allemands qui évitent les soudures.

UN MEMBRE parle dans le sens contraire. Il trouve que les ponts en barres de fer forgé sont beaucoup trop lourds. Le trop grand poids des chaînes occasionne des dépenses considérables et des difficultés sérieuses au levage. Ce poids augmente la résistance que l'on doit demander au fer, et cet excès de résistance augmente le poids, ce qui fait tourner le constructeur dans un cercle vicieux.

L'inégalité de tension des fils de fer n'est pas autant à craindre qu'on l'a dit. Le mode de montage met sensiblement les fils dans les mêmes conditions, et des expériences ont constaté que la résistance du faisceau est, à peu de chose près, la même que celle des éléments qui la composent.

La seule objection qu'il semble possible de faire à l'emploi des fils est l'oxydation; mais M. le rapporteur a répondu suffisamment à cette objection en conseillant l'emploi des fils de fer pour les câbles de suspension, et celui des fers forgés pour les chaînes de retenue, dont le poids n'a pas d'importance

UN MEMBRE explique qu'en Angleterre et en Allemagne les barres en fer laminé à l'usage des ponts sont fabriquées d'une seule pièce, de 6 à 7 mètres de longueur, et portent à chaque bout un renflement donné par le laminoir lui-même, pour ne pas affaiblir la partie de la barre dans laquelle se perce le trou du goujon.

M. le rapporteur appuie la préférence qu'il accorde à l'emploi des câbles de fils de fer à l'extérieur en rappelant les expériences faites après l'accident du pont d'Angers sur le câble rompu, expériences qui ont prouvé qu'après 12 ans de durée, ces fils n'avaient subi aucune altération; il cite également les expériences faites en 1849 sur les fils du pont de Tournon, lors de sa reconstruction, lesquelles ont aussi prouvé qu'après une durée de 25 ans les fils n'avaient rien perdu de leur force.

UN MEMBRE fait observer que, pour avoir confiance dans le résultat de ces expériences, il faudrait savoir exactement dans quelles conditions et de quelle manière elles ont été faites.

UN MEMBRE répond que, pour ce qui est du pont d'Angers, les renseignements qui sont venus à sa connaissance le portent à croire qu'elles ont été faites avec soin, et que, pour les expériences du pont de Tournon, il peut garantir qu'elles ont eu lieu avec une extrême rigueur et les précautions les plus minutieuses par un ingénieur de l'état, dont les dispositions n'étaient rien moins que favorables aux constructeurs : on peut, dès lors, avoir en lui la plus grande confiance.

UN MEMBRE ne voit aucune raison pour employer les barres de fer forgé dans les amarres, attendu que ces barres sont trop susceptibles de s'altérer. Il cite le pont d'Antin et le pont d'Arcole, dont les barres d'amarre en fer forgé auraient vu leur diamètre diminuer de 5 millimètres par l'effet de la rouille.

M. LE RAPPORTEUR dit que les ponts dont il s'agit ne peuvent être cités pour exemples, attendu que les bares d'amarre n'avaient jamais été entretenues, et que l'oxydation dont on parle ne se serait pas produite si l'on s'était préoccupé du soin de les entretenir. Le même effet aurait inévitablement eu lieu sur des fils de fer abandonnés sans entretien à l'action de l'humidité, et les résultats eussent été désastreux si les fils avaient été attaqués aussi violemment que les barres dont on a parlé.

Au pont de Bercy, les barres n'ont perdu qu'un millimètre de leur diamètre, et seulement encore sur une longueur de 1 mètre au dessous du sol.

UN MEMBRE fait remarquer que la visite des câbles en fils de fer du pont suspendu de la Réforme a prouvé que ces câbles n'avaient été nullement atteints par l'oxydation. Il n'a jamais vu de pont suspendu autre que celui d'Angers crouler par suite de la rupture d'un câble en fils de fer, et encore conteste-t-il que ce soit par la rupture de ce câble que le pont est tombé.

La chute des ponts en chaînes, au contraire, est ordinairement due à la rupture des goujons transversaux, dont on ne s'occupe pas assez.

Il reproche aux câbles en lames de ne pouvoir recevoir de peinture à l'intérieur, et il ajoute que les expériences n'ont constaté qu'une différence de 1/150e entre la résistance des éléments d'un câble en fils de fer et celle du câble entier.

UN MEMBRE n'admet pas qu'une barre en fer forgé puisse s'oxyder plus qu'un câble en fils de fer, qui présente à l'action de l'humidité une surface infiniment plus considérable que la barre. Il ne croit pas non plus que la différence de résistance entre un câble en fils de fer et ses éléments ne soit que de 1/150.

UN MEMBRE ajoute, que d'après les expériences de M. Leblanc, cette perte

est de 20 à 25 0/0, qui, jointe à une perte de 10 à 22 0/0 occasionnée par la forme curviligne du câble, réduit sa résistance à environ moitié de celle de ses éléments.

UN MEMBRE déclare accorder une grande confiance aux expériences de M. Leblanc. Une perte de 20 à 25 0/0 lui paraît naturelle; une différence de 1/150 n'est pas appréciable. Il demande à un ingénieur des ponts et chaussées, présent à la séance, de vouloir bien donner quelques renseignements sur les observations qu'il a pu faire dans la visite des différents ponts de Paris.

Il est répondu par un ingénieur étranger à la Société que les renseignements fournis précédemment sur l'oxydation des barres d'amarre des ponts d'Arcole et d'Antin sont exacts; mais il ajoute que les câbles en fils de fer contiennent aussi de la rouille dans leur intérieur.

UN MEMBRE pense que l'on s'est trompé en croyant trouver de la rouille dans l'intérieur des câbles en fil, si ces derniers avaient été entretenus, peints, entourés de chaux grasse en pâte molle que l'on n'aurait pas laissé dessécher.

Il a visité dans la campagne dernière, avec MM. les ingénieurs de l'état, la plupart des ponts construits sur la Loire; il les a tous trouvés en parfait état de conservation, partout les câbles étaient restés entourés de chaux grasse à l'état de pâte molle, et n'avaient subi aucune altération après l'enlèvement de cette chaux. Les câbles, ouverts à l'intérieur par la suppression de quelques ligatures et l'introduction d'un coin en fer, ont présenté une poussière brune que l'on aurait pu prendre pour de la rouille, mais qui n'était réellement formée que par la dessiccation de la peinture, laquelle contient toujours de l'ocre, facilement réductible en poudre d'un jaune brun.

Quant aux fils eux-mêmes, grattés légèrement de manière à enlever la peinture qui les recouvrait, ils se sont présentés aussi intacts qu'au moment de la fabrication des câbles.

UN MEMBRE exprime le désir qu'il soit introduit dans le rapport quelques renseignements sur l'influence des oscillations.

Il lui est répondu que les oscillations occasionnées par la marche ne sont pas verticales, mais horizontales, et qu'elles n'influent par conséquent en rien sur les câbles.

UN MEMBRE combat cette opinion. Il suffit, dit-il, de marcher sur la passerelle de Constantine pour s'assurer que les oscillations sont verticales. Il ajoute que les oscillations se produisent plus facilement sur les câbles en fil de fer, qui forment une courbe régulière, que sur les câbles en barres de fer forgé, qui forment un polygone.

SÉANCE DU 16 MAI.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

Le président donne lecture d'une lettre adressée à la Société par un de ses membres, M. Hubert, dans laquelle il donne les détails suivants sur l'Exposition universelle de Londres.

L'exhibition anglaise, en y comprenant l'Inde et ses autres colonies, prend à elle seule un peu plus de la moitié du vaste bâtiment de Hyde-Park.

La France a ensuite la plus grande place ; puis viennent les autres nations, à peu près dans l'ordre de leur importance.

Il est, du reste, impossible de comparer la valeur ou le mérite des différentes expositions, car la partie anglaise, entièrement terminée, est brillante d'ordre et de propreté, tandis que la partie française et celle des autres nations sont encore encombrées de caisses, de paille et de poussière : c'est un désordre qui n'a rien de séduisant et devant lequel on s'arrête peu.

La Commission de Paris ne s'est pas bien rendu compte de l'espace donné à la France ; elle a refusé des produits qui rempliraient avantageusement certaines salles, et aujourd'hui on écrit de Londres pour les avoir. On les demande avec d'autant plus d'instance, que l'on s'aperçoit, mais malheureusement trop tard, que, si nos industriels l'avaient bien voulu, ils eussent lutté avantageusement avec l'Angleterre, et cela même pour les machines exposées par elle, et qui n'ont, en général, rien de très remarquable.

La cérémonie d'inauguration a été faite avec toute la pompe d'une cour élégante, entourée de l'aristocratie anglaise.

Aussitôt achevée, et quand on a pu circuler, je suis allé tout d'abord au quartier des machines.

Vingt-deux locomotives ont été exposées : quatorze à cylindres intérieurs, six à cylindres extérieurs.

Les plus remarquables sont :

1° Une locomotive, *Lord of the Isles*, à cylindres intérieurs, pour grande voie, de $2^{m},50$, construite dans les ateliers du Great-Western, pour le service de cette ligne.

La chaudière présente 171^{mq} de surface de chauffe.

Cette machine a huit roues ; les roues motrices, placées les secondes à partir de la boîte à feu, ont $2^{m},50$ de diamètre. Cette machine est construite avec soin pour l'exposition.

2° Une locomotive Crampton, pour petite voie, de $1^{m},55$, construite avec le plus grand soin et avec luxe pour l'exposition, est, je crois, la plus grande machine en ce genre ; sa chaudière présente 207^{mq} de surface de chauffe ; elle a les cylindres à l'extérieur, et, à très peu de chose près, les mêmes dispositions que les dernières machines faites pour le chemin de fer

du Nord par MM. Cail et C^e^, sur les dessins de Crampton. Elle a été construite pour le London et North-Western railway par Bury, Curtle et Kennedy.

3° Une locomotive Crampton (dernier brevet), à cylindres intérieurs; elle diffère en outre des machines ci-dessus :

Par l'arbre moteur ou des manivelles, qui ne porte pas les roues motrices; celles-ci sont montées sur un arbre spécial droit; deux longues bielles de couplage extérieures transmettent le mouvement de l'arbre moteur à manivelles aux roues motrices;

Par le mode de suspension : les deux roues d'avant sont très rapprochées et portent sur des ressorts longitudinaux; les roues d'arrière, près la boîte à feu, portent sur un ressort transversal placé en avant des portes du fourneau et au dessous d'elles, sous une plaque en tôle.

Il y a deux foyers séparés par un diaphragme, ayant une ouverture à la partie postérieure du fourneau pour égaliser le tirage. L'arbre à manivelles, ne portant plus les roues motrices, a de plus petites dimensions que dans les autres machines de même force.

Les roues motrices ont 2 mètres de diamètre; la chaudière présente 171 mètres carrés de surface de chauffe.

Cette dernière machine a été construite par Stephenson, de Newcastle, pour un chemin à petite voie. Elle n'a pas été faite pour l'exposition : aussi n'est-elle pas aussi polie que les autres.

Les autres machines ne présentent rien de nouveau, du moins à un premier examen fait à la hâte.

On remarque un grand wagon à voyageurs de 12 mètres de longueur, porté sur quatre roues, contenant des places de 1^re^ et de 2^e^ classe; il est établi avec plus de luxe que les voitures ordinaires des chemins de fer anglais.

MM. James, Watt et C^e^, de Londres et Birmingham, ont exposé une très belle machine de 700 chevaux, à basse pression, à quatre cylindres horizontaux, placés symétriquement aux quatre coins de l'appareil. C'est la pièce la plus importante de l'exposition; elle est destinée à un bateau à hélice.

Les cylindres ont 1 mètre de diamètre; la course est de 1 mètre, et la longueur des bielles de 1^m^,90; les coussinets des menottes ont 0^m^,25, et 0^m^,13 (double) de largeur; les tourillons 0^m^,25.

D'après ses dimensions, on peut conclure que cette machine doit fonctionner à grande vitesse et transmettre directement le mouvement à l'hélice.

Les pompes à air sont au centre, et placées obliquement; elles reçoivent le mouvement directement de l'arbre principal, qui est coudé; le constructeur n'a pas craint de leur donner presque la même vitesse que celle des pistons à vapeur.

A côté de la machine James Watt et C^e^, il s'en trouve une autre à deux cylindres, à grande vitesse, pour transmission directe à une hélice; elle a été construite par MM. Stolhert Slanghtes et C^e^, de Bristol, d'après le brevet de Edwards Slanghtes. Cet ingénieur a mis une transmission de mouvement

pour les deux pompes à air, de façon à réduire la vitesse de celle-ci au quart de celle des pistons à vapeur.

MM. Penn et C°, de Greenwich, ont exposé une de leurs petites machines oscillantes à basse pression pour bateaux, et en outre une machine de bateau d'une disposition nouvelle, à deux cylindres.

Les cylindres sont placés horizontalement; les pistons sont annulaires et liés à des tubes qui traversent les couvercles par deux presse-étoupes; les bielles pénètrent dans ces tubes, de sorte que l'arbre moteur est très rapproché des cylindres à vapeur; en face, sur la même plaque de fondation, se trouvent deux pompes à air dans un condenseur, et deux pompes alimentaires; ces quatre pompes sont liées directement aux pistons à vapeur par quatre tiges qui traversent les couvercles.

Tout l'appareil ainsi ramassé tient nécessairement très peu de place; il est aussi destiné à agir directement sur une hélice. En voyant ces machines, surtout celle de Watt, on est effrayé en pensant à la vitesse que devront prendre les pistons à vapeur, et surtout les pompes à air.

Dans la même salle, on trouve une chaudière à cuire le sucre dans le vide, une presse hydraulique d'une grande puissance pour essayer les fers de suspension des ponts, un marteau pilon, une arcade en fonte d'une forme élégante pour passerelle, un système d'attache et de retenue pour voûtes droites en briques, deux jolies grues en fonte, des signaux de jour et de nuit pour les chemins de fer, et deux machines à faire des briques à jour, ainsi que des tuyaux de drainage; enfin des tuyaux en fonte pour conduites d'eau et de gaz qui n'ont que 14 millimètres d'épaisseur pour 1 mètre de diamètre, et 16 millimètres pour $1^{m},30$.

Les deux salles de machines en mouvement renferment des appareils nombreux et variés; les métiers à filer et à tisser y dominent; ils sont tous d'une exécution parfaite.

Les métiers à la Jacquart sont nombreux et ont reçu en Angleterre quelques nouvelles dispositions qui aideront à les propager encore davantage.

Les machines fonctionnent par groupes, ayant chacun un moteur particulier; ce sont de petites machines à vapeur, qui puisent à un générateur commun placé en dehors du bâtiment de l'exposition.

Il y a aussi environ trente machines à vapeur de petite force dont en général les dispositions ne sont pas très heureuses; les machines rotatives surtout sont presque toutes très bizarres, et il y en qui sont non seulement très mauvaises, mais encore très mal exécutées.

Ce qu'il y a de très remarquable dans ces deux salles, c'est une presse monétaire par A. Maudslay, qui a beaucoup copié notre compatriote, M. Tonnelier; l'exécution en est d'ailleurs parfaite. Cette presse est mise en mouvement par une petite machine à vapeur à deux cylindres dont les dispositions portent le cachet d'un habile ingénieur et d'un praticien exercé, de Maudslay, en un mot, et dont l'exécution ne laisse rien à désirer.

Cette petite machine à vapeur met en mouvement cinq petits modèles des cinq systèmes de machines différentes que Maudslay a adoptés pour bateaux, depuis la machine-mère à balanciers et bâtis ogivals jusqu'aux dernières machines oscillantes, et celles à pistons portant plusieurs tiges.

MM. Maudslay et compagnie ont complété leur exhibition par une grande bielle de bateau, spécimen de leurs grands travaux.

Dans la même salle se trouve une machine assez ingénieusement disposée pour manœuvrer une grue à charger et à décharger des colis de toute nature, d'une manière prompte, facile et économique, au moyen de la pression d'un colonne d'eau.

Il y a un assez grand nombre de pompes à incendie, dont quelques unes sont très puissantes, et sur lesquelles on peut appliquer un grand nombre de travailleurs : il y a là progrès et études fructueuses à faire.

Robinson a exposé une très belle machine oscillante faisant mouvoir un moulin à sucre de grandes dimensions.

La Commission anglaise a donné aux machines et instruments de l'agriculture une place très considérable et qui a été bien remplie.

Les machines à battre et les semoirs se présentent sous toutes les formes.

Pour mettre en mouvement ces appareils nombreux et variés, répandus sur toute la surface d'une exploitation, on fait beaucoup usage de machines à vapeur locomobiles ; j'en ai compté, dans cette salle, dix-neuf modèles différents, dont quelques uns sont très convenablement et même élégamment disposés, ce qui prouverait que l'usage de ces machines est très répandu. Elles s'appliquent également à des pompes et autres machines hydrauliques pour les épuisements et les irrigations.

Il y a trois machines-toupies pour l'extraction du sucre, semblables à peu près à celles qui sont en usage en France.

Les machines-outils pour la fabrication des machines sont très bien exécutées et présentent quelques perfectionnements utiles.

J'ai remarqué un modèle de machine à draguer, copié, avec perfectionnements, sur les anciennes machines employées dans le midi de la France au curage des ports.

La grande galerie longitudinale du Palais de Cristal contient de fort belles choses, dont quelques unes intéressent l'ingénieur.

Telles sont :

Le modèle d'exécution du grand brise-lame de Plymouth, le plus grand ouvrage, je crois, qui existe en ce genre ;

Un très beau phare au 10e ;

Le plan en relief de la ville et du port de Liverpool, avec ses trente-deux docks, ses bassins de carénage, ses cales de construction, ses innombrables navires, le tout exécuté avec beaucoup de soin, et supérieur à ce que nous avons dans le même genre aux Invalides ;

Plusieurs modèles de ponts tubes et de ponts suspendus, utiles à étudier ;

Le plan en relief de l'île de Wight ;

Des modèles de charpentes en bois, en fonte et en fer ;

Une écluse flottante et une cale de carénage également flottante, et que l'on peut immerger à volonté, en remplaçant par de l'eau l'air contenu dans les tubes en tôle dont elle est composée ; cette cale ou radeau est placée sous le navire : on aspire l'eau des tubes, et le navire est soulevé hors de l'eau pour le réparer. Ces derniers modèles fonctionnent dans un bassin plein d'eau.

Dans cette même grande galerie figurent des objets d'art et d'architecture;

De grandes fontaines monumentales en pierre et en fonte; il y en a une très grande, entièrement en cristal, d'un très bel effet;

Un modèle d'église d'une rare perfection d'exécution : il représente l'église de Saint-Nicolas de Hambourg, reconstruite par Georges-Gilbert Scott, architecte de Londres;

Deux beaux groupes de sculpture;

Un kiosque rustique, imitant des branches de chêne, et exécuté en fonte, présentant certaines difficultés de moulage;

Une grande glace de $2^m,50$ de largeur sur $3^m,78$ de hauteur, richement encadrée, exposée comme spécimen des plus grandes glaces exécutées en Angleterre;

Des roues en bois dont la jante est d'un seul morceau courbé à la vapeur; et, parmi elles, une roue de $2^m,25$ de diamètre;

Des systèmes de freins pour voitures de chemin de fer;

Des mâts et vergues de navires qui sont faits en cinq ou six morceaux assez ingénieusement assemblés, puis frettés :

Telles sont les choses les plus remarquables de l'exposition.

Il est ensuite donné communication par M. Goschler d'une note sur le forage d'un puits exécuté par M. Kind à la houillère de Schœneck-Stiring, près Forbach (Moselle).

Il est ensuite donné communication par M. Love d'une note sur l'application de l'électro-magnétisme aux machines locomotives.

MM. Amberhier, Nichles et Cassal eurent l'idée de rechercher s'ils ne pourraient pas entretenir la partie inférieure des roues motrices en mouvement dans un état constant d'aimantation, ou, en d'autres termes, transformer les roues en électro-aimants à pôles mobiles. Pour mettre à exécution cette idée, MM. Amberger, Nichles et Cassal, imaginèrent d'entourer la partie inférieure de la roue motrice d'une bobine qui en suit tous les contours à une faible distance, et dans laquelle cette roue se meut librement comme auparavant. Pour démontrer qu'il y a un surcroît d'adhérence obtenu par ce moyen, ils placèrent, sur un petit plan incliné dont on variait la pente à volonté, un petit chariot dont les deux roues d'avant pouvaient être aimantées au moyen de deux bobines embrassant leur partie inférieure à une faible distance des rails; une corde s'enroulant autour de leur essieu allait se rattacher à un treuil situé à l'extrémité supérieure du plan incliné; à l'arrière, une deuxième corde attachée au châssis passait à la partie inférieure du plan sur une poulie de renvoi, et soutenait à son extrémité un certain nombre de rondelles en fonte, que le chariot, considéré comme moteur, devait entraîner dans son ascension sur le plan incliné. Les choses étant dans cet état, lorsque le treuil était mis en mouvement sans que la pile agît, l'adhérence naturelle étant insuffisante, le chariot restait en place, et ses roues tournaient sur elles-mêmes; mais, dès que le courant électrique était établi, l'adhérence nécessaire était obtenue, et le chariot franchissait rapidement le plan incliné.

Le moyen d'appliquer l'électro-magnétisme aux machines locomotives pour augmenter leur adhésion sans surcharge sur un plan incliné comme sur un plan horizontal était donc trouvé; mais il restait à voir si, sur une grande

échelle et avec un appareil peu encombrant et peu coûteux, on pourrait produire économiquement le degré d'adhérence nécessaire pour remplacer celle due au poids que l'on pourrait distraire des roues motrices d'une locomotive, soit en faisant des machines plus légères, soit en répartissant également sur les six roues le poids des locomotives actuelles. Pour cela, les inventeurs ont établi sur deux rails, formant un plan incliné à 20 centimètres par mètre, une paire de roues de locomotive de $1^m,10$ de diamètre, à l'essieu desquelles sont attachées deux cordes passant sur une poulie de renvoi, et soutenant à leur extrémité un plateau destiné à recevoir des poids; deux autres cordes attachées aux extrémités des raies des deux roues vont s'enrouler sur un treuil placé à l'extrémité du plan incliné, de telle sorte que le tirage s'exerce parallèlement au plan et tangentiellement aux roues. On voit que c'est à peu près la répétition en grand du petit appareil précédemment décrit. On refit avec celui-ci la même expérience, c'est-à-dire que, le plateau étant suffisamment chargé, les roues tournent sur place si les bobines qui les embrassent ne communiquent pas avec la pile; elles montent, au contraire, en traînant le plateau chargé dès que la communication est établie; mais cette fois on obtient les résultats suivants, qui ont une grande valeur pratique.

Par un temps bien sec, l'adhérence due au poids des roues, à celui de son bâtis et au frottement de ce dernier sur les rails, étant de 350 kilogrammes, l'adhérence supplémentaire obtenue au moyen de l'électro-magnétisme est de 450 kilogrammes.

Par un temps de brouillard, lorsque 100 kilog. suffisent pour vaincre l'adhérence des roues et les frottements, l'adhérence magnétique n'a perdu que 50 kilog.; une couche épaisse de suif étendue sur la roue a fait tomber l'adhérence magnétique de 400 kilog. à 280.

Ces résultats sont obtenus au moyen de deux bobines formées chacune d'un fil de cuivre d'un petit diamètre, de 250 mètres de longueur et de seize éléments, pouvant être renfermés dans une boîte de $1^m,60$ de longueur sur $0^m,50$ de largeur et $0^m,45$ de hauteur.

On estime qu'en faisant agir deux piles pareilles sur deux paires de roues, on obtiendrait une adhérence magnétique de 1000 kilog., et que la dépense en acide et en zinc serait environ de 14 fr. pour dix heures de travail continu.

Enfin il importe de ne pas perdre de vue que l'adhérence magnétique est la même, quelle que soit l'inclinaison du chemin.

Tel est le point où en sont arrivés MM. Amberger, Nichles et Cassal.

La discussion s'engage sur cette note.

LE PRÉSIDENT fait observer que ce n'est pas pour augmenter l'adhérence des machines sur les fortes rampes que l'on a augmenté le poids des locomotives, mais pour les rendre plus puissantes. Même en employant le système dont il est question, il faudra toujours des machines lourdes et puissantes pour traîner de fortes charges.

UN MEMBRE ajoute qu'il ne faut pas s'exagérer les services que pourra rendre le système électro-magnétique appliqué aux machines locomotives. Sur le chemin de fer d'Orléans, on cherche à diminuer autant que possible e poids des machines; on n'a pu, toutefois, descendre au dessous de 22 o nnes, mais jamais on n'a manqué d'adhérence. Ce qui le prouve, c'est

qu'on n'a jamais couplé que quatre roues, alors qu'il eût été facile d'en coupler six, et d'obtenir ainsi plus d'adhérence.

En thèse générale, il est d'avis qu'il faut coupler les roues le moins possible. Pour gravir de fortes rampes, c'est surtout de la puissance qu'il faut donner aux machines ; l'adhérence qu'elles ont dans l'état actuel est suffisante.

LE MEMBRE qui a la parole profite de la circonstance qui se présente pour dire un mot de la position du centre de gravité des machines locomotives.

On a cru jusqu'à présent qu'il était indispensable de placer le centre de gravité des machines locomotives beaucoup en avant de l'essieu moteur. Cette règle n'a rien d'absolu. Parmi les machines en service sur le chemin de fer d'Orléans, les machines Cavé ont leur centre de gravité à 3 ou 4 centimètres en avant de l'essieu moteur, celles de Derosne et Cail et de Gouin à 17 centimètres en arrière, et celles que le chef actuel de la traction a fait construire lui-même à 3 millimètres du centre de l'essieu moteur. Malgré ces différences de position du centre de gravité, toutes les machines du chemin d'Orléans ont une stabilité complète. La répartition de la charge est donc une question de disposition qui n'a pas par elle-même un grand intérêt.

Revenant au système qui a fait l'objet de la note en discussion, il conclut que, pour les voyageurs et pour les freins, l'emploi de ce système peut avoir quelques avantages, mais il ne le croit pas destiné à rien changer à l'exécution des tracés de chemin de fer.

L'AUTEUR de la note persiste dans cette opinion que le système électro-magnétique rendra de grands services à l'exploitation des chemins de fer, en permettant de gravir de fortes rampes sans augmenter le poids des machines locomotives. Il s'appuie principalement sur ce fait que l'adhérence n'augmente, dans les circonstances actuelles, que très peu en proportion du poids de la machine, tandis que l'adhérence magnétique est invariable, quelle que soit l'inclinaison de la rampe.

UN MEMBRE combat cette opinion sur l'influence du poids des locomotives eu égard à l'adhérence, et émet des doutes sur l'augmentation d'adhérence que produira le magnétisme.

Les expériences qui ont été faites jusqu'à présent ne sont pas suffisantes, et il serait utile de les étendre davantage avant de faire de grandes dépenses qu'occasionneraient des essais sur un chemin de fer.

L'application régulière de ce système coûterait d'ailleurs fort cher, attendu que l'adhérence ne peut être produite que par d'énormes courants, qui, mis en communication avec la terre, même par de mauvais conducteurs, se perdraient facilement, à cause de la multiplicité des points de contact, comme il arrive dans les télégraphes électriques, si gravement influencés par les variations atmosphériques.

La preuve de ces pertes se trouve même dans les expériences de MM. Amberger, Nichles et Cassal, qui ont vu les effets diminuer sensiblement sur des rails mouillés ou couverts d'un corps gras à cause de la communication établie avec le sol.

Il faudrait expérimenter sur des longueurs de rails beaucoup plus considérables que celles qui ont servi jusqu'à présent.

Dans le cas de réussite du système, son emploi permettra de traîner de

plus lourdes charges qu'aujourd'hui ; les trains pourront être de 500 tonnes, de 1000 tonnes ; mais on ne diminuera pas pour cela les poids que devront supporter les rails, et l'on ne modifiera pas l'exécution des chemins de fer.

L'AUTEUR de la note répond que l'action d'un télégraphe électrique ne peut être comparée avec celle de l'électro-aimant dont il est question. Il n'y a pas ici contact de l'électricité avec la terre ; c'est la roue qui, à distance, est transformée en un aimant qui ne perd pas de sa force par la longueur du fer sur lequel il vient s'appliquer.

UN MEMBRE (le préopinant) réplique que l'appareil est le même que celui employé pour le télégraphe électrique, avec lequel le courant se perd, même sans contact. L'action de l'électro-aimant n'est pas absolue ; c'est celle d'un courant, qui, pour être maintenu, exige la dépense d'une certaine quantité de matière.

UN MEMBRE demande à quelle vitesse on a fait marcher les roues sur les rails. Il pense qu'à la vitesse ordinaire des chemins de fer, la portion de la roue qui s'approche du rail n'a pas été aimantée.

L'AUTEUR de la note répond que la vitesse des expériences était faible, mais que la roue est aimantée de chaque côté de son point de contact avec le rail, et que, la vitesse de l'électricité étant beaucoup plus grande que celle de la machine, il ne croit pas que les craintes dont on parle soient fondées. Il persiste à demander qu'une expérience en grand soit tentée.

La discussion est close.

SÉANCE DU 6 JUIN 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

M. le président donne lecture d'une lettre de M. Lechatellier, ingénieur en chef des mines, dans laquelle celui-ci rappelle qu'en proposant les règles à suivre pour équilibrer les différents systèmes de machines locomotives, il a conseillé, pour les machines à marchandises ou mixtes à cylindres intérieurs, de décaler les manivelles d'accouplement d'un angle qui doit être calculé pour chaque cas particulier, mais qui est d'environ 18 à 20°, de manière à tenir compte du rapport des écartements des pièces entre elles. Tout récemment M. Lavalley lui a fait remarquer que cette disposition présentait un inconvénient très sérieux qui doit empêcher de l'appliquer. En effet, les deux manivelles d'accouplement, qui faisaient entre elles un angle de 90°, ne font plus qu'un angle de 50°, et, par suite, lorsqu'une bielle est au point mort, l'autre est encore très inclinée sur la manivelle, et elle supporte un effort très considérable pour transmettre à l'essieu accouplé la part d'action motrice qui lui est afférente ; il est essentiel, par suite, de maintenir à angle droit les deux manivelles d'accouplement, et c'est seulement par des contre-

poids additionnels qu'on doit chercher à réaliser un équilibre complet, comme dans les machines à cylindres extérieurs. — Le décalage de la roue ne doit être pratiqué que pour les machines à cylindres extérieurs, à roues indépendantes.

CRISTALLISATION DU ZINC.

Il est ensuite donné communication d'une note de M. Huet sur la cristallisation du zinc par M. Germain, ingénieur, chargé de la fabrication à l'usine de Maresnes.

La calamine est grillée dans des fours à réverbère, chauffés par les chaleurs perdues des fours belges à réduction. C'est dans ces fours que l'on obtient des cristaux, dans les circonstances suivantes :

On place 18 kilogr. de zinc dans une lingotière, que l'on introduit dans un four à réverbère chauffé au rouge; on ferme ensuite le four, de manière à avoir le refroidissement le plus lent possible. Au bout de quarant-huit heures le four est froid, et le métal présente une masse cristallisée.

Ce sont des prismes droits à six pans. Quelques uns de ces cristaux ont jusqu'à 4 millim. de hauteur; le diamètre de la base est de 2 millim.

Dans les premiers essais tentés par M. Germain, le refroidissement fut opéré en sept ou huit heures; la cristallisation était parfaitement déterminée : c'était une masse de petites aiguilles dont la forme n'était cependant appréciable qu'à la loupe. A mesure que le refroidissement s'opérait plus lentement, la grosseur des cristaux a augmenté jusqu'aux dimensions indiquées plus haut.

M. Germain continue ses expériences, et espère arriver à des cristaux plus gros encore.

EXPOSITION DE LONDRES.

M. Hubert communique de nouveaux renseignements sur l'exposition universelle de Londres.

MACHINES DE BATEAUX A VAPEUR.

MM. Wast Slanghter et Penn ont exposé chacun une machine de bateaux à vapeur à grande vitesse et à transmission directe; ils sont parvenus ainsi à présenter des machines puissantes sous un petit volume : c'est là que sera le grand perfectionnement, si les résultats sont satisfaisants.

En effet, la machine de 700 chevaux de Watt, estimée à vue d'œil, ne doit pas peser plus de 60 à 80 tonnes, tandis que la dernière machine construite à Indret pour le *Napoléon* pèse au moins quatre fois plus. La grande roue de transmission au pignon de l'hélice montée sur ce dernier navire pèse seule, avec son arbre, 30 tonnes.

La principale difficulté à vaincre, dans les machines à grande vitesse pour bateaux, est l'établissement des pompes à air, dont on a réduit jusqu'ici la vitesse autant que possible, pour éviter les chocs.

MM. Watt et compagnie n'ont pas craint d'aborder la difficulté. Leurs pompes à air, dont l'axe est incliné à 45°, auront une vitesse égale aux trois cinquièmes de celle des pistons à vapeur.

MM. Slaughter n'ont pas été aussi hardis: ils ont placé leurs pompes à air verticalement, et une transmission de mouvement leur a donné une vitesse égale au quart seulement de celle des pistons à vapeur.

Mais MM. Penn et compagnie ont été plus audacieux: leurs pompes à air sont placées horizontalement, et les pistons des pompes à air sont liés par des tiges aux pistons à vapeur, de façon qu'ils auront la même vitesse.

M. HUBERT ignore comment sont disposés les clapets; mais il est probable que les pistons des pompes à air sont pleins, et que des clapets obliques aux extrémités des cylindres en font des pompes à double effet. On évitera par là en partie l'inconvénient résultant du mouvement des pistons dans un milieu ayant des densités différentes.

BRISE-LAME DE PLYMOUTH.

Le brise-lame de Plymouth est un ouvrage remarquable. Un dessin, accompagné d'une légende, donne tout le secret de la solidité de cet appareil et de sa construction. Cette légende indique que les enrochements sont composés exclusivement de gros blocs, dont les plus petits cubent environ 3 mètres cubes.

Le phénomène de l'instabilité des enrochements était connu de M. Hubert par une observation qui lui est personnelle.

Après une tempête, il avait été visiter les débris d'un navire qui s'était perdu en avant du brise-lame de Cette, et il avait remarqué qu'un câble d'ancre se trouvait enchevêtré au milieu des blocs des enrochements et engagés sous eux.

Il devenait donc évident que les blocs d'enrochements du brise-lame, qui ne cubent guère qu'un mètre en moyenne, étaient mis en mouvement pendant les tempêtes, et que, par suite, les talus devaient s'étendre, déchausser les fondations et produire des affouillements. C'est, en effet, ce qui avait eu lieu, et c'est ce qu'il a vérifié par des sondages.

La règle est donc certaine, et si l'on veut des talus très inclinés pour faire approcher les navires aussi près que possible, les blocs d'enrochement doivent cuber de 3 à 4 mètres, et leur volume ne peut être moindre que dans le cas seulement où l'on admet des talus très allongés.

MINÉRALOGIE.

La minéralogie occupe une place importance à l'exposition de Londres. On lui devait bien cela dans un pays dont elle constitue la principale richesse.

Des échantillons de toutes sortes sont établis avec profusion; mais la houille domine.

Au milieu de tous ces échantillons se trouvent des modèles d'usine au

complet, avec tout leur matériel, leur outillage, et de petites figures qui exécutent toutes les opérations de la fabrication.

Ces exhibitions sont en général peu intéressantes au point de vue de l'étude, car elles ne représentent presque jamais les derniers perfectionnements des industries.

Ces tableaux offrent plus d'intérêt quand ils représentent les industries des mines, et, entre autres, l'extraction de la houille.

Il y a plusieurs grands cubes de bois dont la surface, plus ou moins accidentée, représente le sol d'une concession sur l'étendue de laquelle on voit çà et là de petits bâtiments en relief, flanqués de leurs cheminées, et qui indiquent des puits d'extraction.

Ces grands cubes sont coupés dans le sens vertical comme par des traits de scie, et, en en écartant les diverses parties, on peut juger en quelques instants de tout le système d'exploitation; on voit en coupe non seulement les différentes couches du terrain et de houille, mais leur direction, tantôt horizontale, tantôt verticale, et tantôt inclinée. On peut apprécier avec beaucoup d'exactitude et se rendre parfaitement compte des travaux du boisage, de ceux si intéressants du cuvelage, et enfin des méthodes employées pour les déblais et remblais qui s'exécutent dans les galeries au fur et à mesure que l'on avance dans l'extraction.

Outre ces blocs ou cubes coupés verticalement, il y a de grandes tables ou plates-formes qui sont des coupes horizontales montrant tout le travail des mines, les chemins de fer, les galeries, etc.

A côté des échantillons de houille on n'a pas omis les schistes, qui forment les toits et les murs des veines, et qui donnent les empreintes d'un grand nombre de végétaux, où la fougère domine, comme toujours.

Dans la grande galerie on a exposé un tronc d'arbe de 2 mètres de longueur et de 30 centimètres de diamètre, dont la pétrification est complète d'un côté, et diminue graduellement jusqu'à l'aubier du côté opposé, qui est pourri et qui tombe en poussière. Je ne crois pas qu'il existe un échantillon aussi curieux et aussi important de cette transformation.

Les produits métallurgiques présentent beaucoup d'intérêt. Les cuivres rouges, sous toutes les formes, sont de qualités tout à fait supérieures.

Pour les fers, outre les T simples et doubles, et les cornières, que l'on fabrique très bien, il y a des échantillons dont les barres présentent des sections polygonales de toutes sortes, des hexagones, des pantagones et des octogones.

INDUSTRIES DIVERSES.

La corderie, tant pour la marine que pour l'industrie, montre de très beaux échantillons; il y a des câbles plats pour les tambours des puits d'extraction des mines qui présentent quelques perfectionnements dans la manière dont les éléments sont cousus entre eux.

La salle livrée à la carrosserie anglaise est assez grande et entièrement occupée; on y remarque de très jolies voitures, d'une exécution soignée, surtout parmi les voitures basses à quatre roues.

Dans la grande galerie longitudinale on remarque une très grande grille en fonte, pour parc ou château, qui a non seulement du mérite comme œuvre d'art, mais encore comme produit de fonderie.

Il faut dire, du reste, qu'après les événements de février, beaucoup d'artistes français se sont expatriés, et sont allés mettre leur talent à la disposition des capitaux anglais.

Il en résulte que, parmi les pièces les plus remarquables de l'exposition anglaise en orfévrerie, bronze, meubles, etc., plusieurs sont, par le fait, des produits français.

Les meubles et l'ébénisterie sont exécutés d'une manière très durable; c'est un peu le contraire de chez nous : il y a des meubles de grandes dimensions, pour de grands appartements, et dans lesquels la sculpture sur bois est prodiguée, mais en général avec peu de goût.

La marquetterie, comprenant les parquets de couleurs en bois, a fourni de beaux échantillons, très variés et en grand nombre.

Les laques de Chine se montrent en ouvrages de toutes sortes et de toutes dimensions; les peintures sont très belles.

Auprès de la grille monumentale dont nous venons de parler plus haut se trouve une grille en fonte d'un joli style, dont la base inférieure, qui sert de bassin, est en tôle gauffrée, imitant les formes et les moulures de la pierre de taille; on lui en donne d'ailleurs tout l'aspect par plusieurs couches de peinture, que l'on recouvre de sable blanc très fin avant qu'elles soient sèches. C'est un système à appliquer dans les pays où la tôle est commune et la pierre de taille rare.

Dans ce bassin, et au niveau de la surface de l'eau, se balancent des imitations de plantes et de fleurs aquatiques très bien exécutées; feuilles et fleurs sont aussi en tôle peinte, et sont maintenues par des tiges en fil de fer très flexibles fixées au fond : l'idée est heureuse.

L'art céramique, pour les besoins de l'agriculture, est très avancé en Angleterre, par suite de la rareté et du haut prix de la pierre. On fait en terre cuite des corniches, des moulures, des sculptures, des blocs de toutes formes et de toutes dimensions. Glasgow a fourni les échantillons les plus variés; cette ville a également exposé en ce genre des fragments de couleurs pour des carrelages imitant la mosaïque.

Les poteries de Londres pour la fabrication des produits chimiques sont dignes d'attention : il y a des serpentins d'un seul morceau qui, développés, auraient une longueur de 10 à 12 mètres.

Outre les terres cuites, il y a des produits cémentés en pierres factices, carrelage, mosaïque, etc., qui ne laissent rien à désirer. Il y a surtout un produit appelé serpentine qui imite parfaitement les granits polis et les plus beaux marbres.

L'industrie du carton-pierre a pris aussi de grands développements en Angleterre.

Les meubles en fer, tels que lits, tables, ne présentent rien de remarquable, et l'industrie parisienne fait mieux.

Il est impossible d'égaler le luxe de l'innombrable quantité de cheminées en fonte, fer et cuivre, qui garnissent les salles qu'on leur a livrées; elles sont toutes polies et garnies de leurs élégants tisonniers.

Il y a des cheminées des plus grandes dimensions, et elles sont en général établies avec un luxe inouï.

Mais dans tous ces appareils rien n'est fait pour économiser le combustible, à cause, sans doute, de son bas prix en Angleterre.

On voit très peu de ces élégants calorifères d'appartements, si répandus en France, et ceux qu'on y trouve sont presque tous d'invention française.

La papeterie et la reliure anglaise ont un cachet tout particulier. Parmi les papiers et les livres, on remarque une machine à faire des enveloppes de lettres. Cette machine, qui fonctionne loin de toutes les autres, sans que l'on sache comment le mouvement lui est donné, est assez ingénieusement disposée, sans pourtant présenter rien d'extraordinaire.

L'étage supérieur de l'exposition a été réservé pour les objets délicats et de peu de poids.

Parmi les objets qui peuvent intéresser l'ingénieur, on peut citer l'horlogerie, les instruments de mathématiques et de physique, et, entre autres, un grand nombre d'instruments et d'appareils de télégraphe électrique de tous les systèmes; beaucoup d'instruments d'astronomie et de marine, un grand nombre de constructions navales : vaisseaux, frégates, bâtiments légers, etc.

Les cuirs ouvrés et unis de Leeds sont en grande quantité et paraissent fort beaux, ainsi que les ouvrages en sellerie de Dublin et de Londres.

La chambre où sont les fourrures préparées à Londres est garnie de superbes échantillons.

Les mousselines de Glasgow, unies et façonnées, sont admirables de finesse.

Les popelines et les flanelles anglaises, qui sont fort belles et qui ont été jusqu'alors supérieures aux nôtres, ne tarderont pas à leur céder le pas.

L'Inde a envoyé beaucoup de ses produits, des tissus de toute espèce, des châles, des meubles en bois sculpté d'une rare perfection comme travail de patience.

Pour donner une idée de la richesse et de la variété de ses cultures, elle a envoyé des imitations de ses fruits et de ses fleurs; puis enfin des costumes, des instruments de musique, armes, ustensiles de ménage, des modèles de voitures, de palanquins et de maisons.

Pour donner une idée plus complète de ses mœurs, de ses usages et des petites industries du peuple, ils ont un tableau en relief placé sur une immense table, représentant un paysage avec maisons; ce paysage est couvert de petites figures qui exécutent toutes sortes de travaux et d'ouvrages, depuis le jardinier labourant avec des outils d'une forme particulière jusqu'à l'ouvrier tissant les plus riches cachemires.

Les autres nations, sans en excepter même la Belgique et les Etats-Unis, ne présentent que peu d'intérêt pour l'ingénieur.

La France occupera donc le deuxième rang; et il est bien prouvé que, si elle avait voulu, elle pouvait marcher de pair avec l'Angleterre, même pour les machines.

La Belgique a envoyé une grande machine de bateau qui ne présente rien de nouveau, dont l'exécution est médiocre et les proportions mauvaises. Il y a à côté deux locomotives très ordinaires.

Les Etats-Unis n'ont fourni en machines que des objets insignifiants.

L'Allemagne presque rien.

L'Autriche et la Prusse ont envoyé de très beaux meubles, des tissus et des produits divers.

L'Espagne, la Grèce, la Turquie, la Chine, les Etats Barbaresques et la Perse ont envoyé des produits du sol, et beaucoup de curiosités dans le genre de l'exhibition de l'Inde.

Il ne reste plus qu'à parler de la France; mais elle n'est pas prête!

Il est ensuite donné communication d'une note de M. Sautter sur les chemins de fer suisses.

M. Love donne de nouveaux renseignements sur l'application de l'électro-magnétisme aux machines locomotives.

Dans la séance précédente, un membre de la société a exprimé des doutes sur la quantité d'adhérence produite et sur le prix de revient; il a dit que, l'expérience ayant été faite sur une seule longueur de rails isolés, on pouvait prévoir ce qui arriverait sur une longueur indéfinie de rails, c'est-à-dire sur une voie de fer; le courant étant mis en rapport avec le rail par l'intermédiaire de la roue, et le rail lui-même étant en contact avec la terre par une multitude de points, il y aurait déperdition de fluide, comme dans un télégraphe électrique par un temps de brouillard ou de pluie, de sorte qu'il faudrait une pile énorme et une dépense considérable pour obtenir un degré d'adhérence convenable.

L'auteur de la note répondit que, dans le cas actuel, l'appareil électrique n'était nulle part en contact avec la terre; que la roue motrice n'était pas électrisée, mais aimantée, et qu'un aimant ne perdait rien de sa force attractive pour être mis en contact avec une masse de fer plus grande et avec le sol.

L'auteur de l'objection a soutenu que, les appareils étant les mêmes et fondés sur le même principe, les circonstances atmosphériques dont il avait parlé les influenceraient de la même manière, et que, si, par un temps de brouillard et de pluie, les télégraphes fonctionnent difficilement, par les mêmes temps l'adhérence magnétique se trouverait considérablement réduite.

L'auteur de la note répond aujourd'hui que les appareils sont, il est vrai, les mêmes dans les deux cas, mais qu'ils ne sont pas placés dans la même situation, ce qui fait toute la différence. Dans le télégraphe électrique, un fil nu reposant sur un grand nombre d'appuis, une légère couche d'humidité le rend un peu conducteur de l'électricité. Le brouillard même, dans lequel le fil est plongé parfois, est aussi conducteur jusqu'à un certain point. On conçoit donc qu'il arrive que dans ces conditions le télégraphe électrique fonctionne difficilement, ou même pas du tout. Tandis que dans l'appareil que l'on propose d'appliquer aux machines locomotives le fil est entouré sur toute sa longueur d'une substance isolante (la soie); il ne repose pas sur un grand nombre d'appuis; il s'enroule sur lui-même, et autour d'une bobine qui n'est nulle part en contact avec le sol. Et d'ailleurs le fût-elle, que cela ne ferait absolument rien, puisque le fil est entouré de soie, que l'on pourrait encore remplacer par la *gutta-percha*, si l'on craignait que la soie n'établît point un isolement suffisant dans un air chargé de vapeurs. On sait que la *gutta-percha* conserve tout entière au fil l'électricité dont il est chargé, lors même qu'il est plongé dans l'eau ou enfoui dans la terre. On voit donc

que les faits actuellement acquis à la science résolvent complétement les objections qui ont été faites, et que par conséquent, avec l'appareil très simple et peu dispendieux de MM. Amberger, Nichles et Cassal, l'aimantation des roues sera la même sur une voie de fer que sur deux rails isolés.

Il est démontré qu'un électro-aimant étant mis en contact avec une certaine masse de fer, on peut augmenter cette masse à volonté sans qu'il perde rien de sa force adhésive ; l'expérience suivante le prouve.

Un bout de rail étant pris entre les deux mâchoires d'un étau, on y fait descendre un électro-aimant suspendu à l'extrémité d'une corde passant sur deux poulies de renvoi, et soutenant à son autre extrémité un seau chargé de tout le poids que l'aimant était capable de retenir. L'appareil étant disposé de la sorte, il est évident que l'aimant se détachera, s'il perd de sa force adhésive par l'adjonction au bout du rail d'une masse de fer beaucoup plus forte. Cette adjonction fut faite, et l'électro-aimant resta en place. On voit donc qu'il n'y a pas à redouter, pour l'aimantation de la roue et l'adhérence qui en résulte, une longueur indéfinie de rails.

TRAVAUX DE L'INSTITUT DES INGÉNIEURS CIVILS ANGLAIS.

Un membre communique à la Société un compte-rendu des travaux de l'Institut des ingénieurs civils anglais qui traite de la dénomination de la force des machines à vapeur.

Il est reconnu que James Watt prit comme unité, pour estimer la puissance des machines à vapeur, l'effet produit par un fort cheval tirant un poids suspendu à une poulie (ce qui équivaut à 33,000 livres soulevées par minute à la hauteur d'un pied anglais). Il est devenu d'usage, parmi les constructeurs, de donner un excédant de puissance, afin de suppléer aux frottements et aux imperfections inévitables de la machine, de telle sorte qu'en ce moment l'énonciation de la foce d'une machine par la force d'un nombre quelconque de chevaux n'a pas de sens déterminé.

On a cependant prétendu qu'il fallait conserver l'unité de 33,000 livres, et qu'en supposant deux machines également construites, il n'y avait qu'à comparer les dimensions des cylindres, la pression effective de la vapeur sur le piston, et la vitesse de celui-ci, pour déterminer leur pouvoir relatif. Ceci est en effet montré par l'indicateur, qui, habituellement employé, donne une appréciation exacte du pouvoir d'une machine à vapeur.

Boulton et Watt avaient l'habitude de calculer la force d'une machine d'après la vitesse du piston, combinée avec les dimensions du cylindre et la pression moyenne de la vapeur, comme le montre l'indicateur. Le vague et l'incertitude répandus sur ce sujet depuis ces célèbres constructeurs doivent être attribués aux quantités arbitraires offertes comme unité fondamentale.

Pour éviter les résultats de l'imperfection dans l'unité de la force d'un cheval, choisie par Watt, qui exprime et la force d'action et l'espace qu'elle parcourt dans un temps donné, on a prouvé que l'étalon proposé, d'une quantité d'eau vaporisée dans un temps donné par une quantité de combustible donnée, n'a aucune valeur, car ce n'est pas seulement la génération de la vapeur, mais encore et surtout son utilisation qu'il faut mettre en ligne de compte, et ceci ne tendrait qu'à compliquer la question.

Pour les pompes à feu des mines de Cornwall, l'expression de *force de cheval* est à peu près inconnue, ces machines étant vendues pour élever une certaine quantité d'eau, ce qui forme une espèce d'unité qui peut être aisément évaluée en établissant une comparaison avec le produit des machines dans les districts où l'unité de 33,000 livres est comptée comme force d'un cheval.

La question de savoir, sous le point de vue commercial, ce que les constructeurs doivent fournir comme force d'un cheval, n'a pas besoin d'être discutée : car le pouvoir d'une machine n'est qu'un élément secondaire de l'évaluation de son prix, qui varie nécessairement suivant l'application qu'on en fait. L'excédant du pouvoir donné aujourd'hui par les constructeurs à leurs machines provient évidemment des progrès réalisés dans leur construction, soit par l'emploi d'outils perfectionnés, soit par la substitution dans les pistons et dans la garniture de segments et d'anneaux métalliques aux anneaux de chanvre, soit par des chemins de vapeur plus parfaits, soit enfin par plusieurs autres perfectionnements tout à fait à part, et n'ayant aucun rapport avec la question de l'unité fondamentale établie sur la force d'un cheval, et qu'on croit devoir ne pas changer, n'ayant rien de mieux à lui substituer.

SÉANCE DU 20 JUIN 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

Suite de la discussion sur la construction des ponts suspendus.

LE RAPPORTEUR fait un résumé succinct des questions qui ont été déjà discutées et de celles qui restent à discuter.

On fait observer que, depuis la dernière séance, un rapport a été publié par le gouvernement dans les *Annales des ponts et chaussées* ; que ce rapport indique les causes de la chute du pont d'Angers et pose des questions de principe qu'il est urgent de discuter, lors même qu'on interromprait la discussion pendante et que l'on aurait à revenir sur des questions déjà traitées, mais qui ne l'ont été que d'une manière insuffisante, puisque ce document n'était pas connu.

UN MEMBRE répond que le rapport dont il s'agit n'est pas celui de la commission du gouvernement, mais seulement d'une commission locale instituée par le préfet, et n'a pas le caractère officiel qu'on semble lui attribuer.

LE RAPPORTEUR ajoute que les questions qui viennent d'être indiquées seront traitées avec le plus grand détail lors de la discussion du chapitre relatif à la chute du pont d'Angers, et que ces questions ont d'ailleurs été trai-

tées dans son rapport, attendu qu'il connaissait à l'avance le document qui vient d'être publié.

UN MEMBRE ne se souvient pas que l'on se soit occupé de la question des oscillations qui, dans ce cas, ont soumis le pont d'Angers à des efforts bien plus considérables que ceux auxquels il aurait eu à résister dans le cas des épreuves ordinaires de l'administration. Le rapport de la commission préfectorale établit que les câbles altérés avaient encore conservé les 2/3 de leur résistance absolue; qu'ils auraient, par conséquent, résisté aux épreuves administratives, et qu'ils n'ont pu résister à l'accident. C'est un point important qu'il était utile de traiter.

Il ajoute que, si l'on veut arriver à une codification de la construction des ponts suspendus, on entreprend une chose impossible; il y a dans la Société deux opinions trop tranchées pour pouvoir se fondre en une seule, et l'on n'arrivera pas à émettre l'avis de la Société sur la voie à suivre dans la construction des ponts suspendus.

LE RAPPORTEUR répond que l'on ne pourra évidemment formuler que l'opinion de la commission; mais qu'en indiquant ce système il a discuté toute la question, en donnant le pour et le contre et en expliquant les avantages et les inconvénients de chaque système.

Il traite ensuite la question des supports fixes et des supports mobiles.

On demande quelle est l'opinion de la commission sur la préférence à donner à l'un ou à l'autre de ces systèmes de supports.

LE RAPPORTEUR répond que la commission préfère les supports fixes, parce que, dans le cas d'accidents, les chocs sont beaucoup moins considérables, les maçonneries moins exposées à de graves avaries, et aussi parce que les supports mobiles peuvent occasionner eux-mêmes des accidents en sortant de leurs patins. La commission reconnaît cependant qu'il y a certains cas où l'emploi des supports mobiles peut être préféré.

UN MEMBRE pense que ce n'est, en général, que la question d'économie qui a conduit à l'emploi des supports mobiles.

UN MEMBRE dit que le choix à faire dépend de la localité, de la nature du sol; que, d'un côté, si les supports du pont d'Angers avaient été fixés, l'un des câbles de retenue eût pu se rompre à l'un des quatre points d'attache sans entraîner la chute des trois autres, tandis que, d'un autre côté, le pont de Cubjac, déjà compromis par le mauvais sol sur lequel reposent ses fondations, avec l'emploi de supports légers, l'eût été beaucoup plus encore si l'on eût employé des supports fixes. Toutes les fois que le fond est bon, il faut employer des supports fixes, et les supports mobiles ne peuvent être considérés que comme un pis-aller, et non comme un progrès et une règle.

UN MEMBRE croit que dans la discussion on fait confusion entre les piles et les culées. Pour les culées, on ne peut donner le nom de supports fixes aux piliers en maçonnerie que l'on emploie, car ils sont toujours surmontés d'une pièce mobile en fer ou en fonte, qui reçoit la suspension, et qui permet les mouvements des chaînes ou des câbles. Donc, si une chaîne vient à se rompre, le pont tombera inévitablement. La nature du support n'a aucune influence sur les fondations, parce que la surface nécessaire sur le sol

dépend du poids à supporter, et que, dans tous les cas, on doit faire supporter au sol le même poids par unité de surface.

Pour les piles, il préfère les supports mobiles, qui permettent de faire des piles minces, tandis que, pour les piles-culées, il faut de lourdes masses, toujours d'un très mauvais effet.

LE RAPPORTEUR continue son exposé par l'examen des ponts à plusieurs travées, et traite du système des piles-culées et de celui des fléaux mobiles avec haubans.

UN MEMBRE pense que la question principale dont un ingénieur doit se préoccuper pour faire un choix est la question d'économie, et qu'à dépense égale il préférera toujours construire des ponts avec haubans, parce qu'il faudra beaucoup moins de temps pour élever des piles de $1^{m},50$ de largeur moyenne, que pour élever des piles-culées de 6 mètres de largeur. De plus, un support mobile peut être mis en place en un jour, et il faut plusieurs mois pour élever une pile en maçonnerie.

Il ajoute que, pour les fondations, les piles-culées présentent plus d'obstacles à l'action des eaux ; elles sont plus affouillables et plus exposées à être emportées, ce qui a été constaté dans les inondations de la Loire et de la Durance, qui ont détruit les piles de plusieurs ponts à piles-culées, tandis que les piles des ponts à haubans ont parfaitement résisté.

Il ne voit aucune raison à donner contre les ponts à haubans ; la fonte employée en supports mobiles n'est pas altérable comme la maçonnerie ; elle est soumise à un effort de pression, tandis que la maçonnerie des piles-culées est soumise à un effort de traction horizontale, qui est la plus mauvaise condition de son emploi. Enfin, les haubans, étant bien entretenus, présentent toute la sécurité désirable.

UN MEMBRE n'admet pas qu'un ingénieur doive se préoccuper avant tout de dépenser le moins possible. C'est une idée qui peut être applicable au point de vue du revenu d'une entreprise commerciale ; mais, dans l'exécution des travaux, on doit surtout se préoccuper de pourvoir à leur solidité et d'éviter les accidents. A son avis, l'emploi des haubans ne peut être considéré que comme un expédient dont on se sert pour se tirer d'une affaire difficile ; mais ils ne peuvent être, d'une manière absolue et en principe, préférés aux ponts à larges fondations. Si les ponts détruits par les eaux sur la Loire et la Durance avaient été bien fondés, ils ne seraient pas tombés. Tous les ponts, quelle que soit leur nature, ont besoin de points d'appui, et l'on doit rechercher la solidité spéciale de chacun d'eux ; quant à la doctrine qu'un point d'appui mince soit moins affouillable dans le lit d'un fleuve qu'un autre plus épais, il n'est pas acceptable : car, si ces points d'appui viennent à manquer, les ponts tomberont nécessairement.

LE RAPPORTEUR est aussi d'avis que les ponts à haubans peuvent être employés sur les cours d'eau dont le lit est resserré, et où il importe de ne pas apporter d'obstacles à l'écoulement ni d'entraves à la navigation ; mais il regarde aussi cet emploi comme exceptionnel.

On fait observer que les ponts à haubans sont généralement employés avantageusement quand il y a plusieurs travées ; qu'ils peuvent être appliqués indifféremment dans toutes les localités ; que presque tous ceux construits, le sont en pays plat avec des levées aux abords. Il cite, sur la Seine,

les ponts de Conflans, de Triel, d'Elbeuf; sur la Loire, les ponts d'Ancenis, de Chalonne, de Mont-Jean, de Port-Boulet, de Tours, de Châteauneuf; sur la Durance, de Cavaillon; sur la Moselle, de Novecent, etc.

L'ordre de la discussion amène ensuite l'exposé des causes probables de la chute du pont d'Angers.

LE RAPPORTEUR rappelle que ce pont n'avait qu'une seule travée, dont la largeur était de 100 mètres environ. Le tablier était supporté de chaque côté par un seul câble reposant sur des supports mobiles, et composé de quatre faisceaux qui, à 3 mètres au-dessous du sol, se divisaient en seize autres, dont chacun avait un amarrage spécial.

L'un des câbles de retenue s'est rompu au point de division, l'autre câble de retenue s'est rompu immédiatement, et les câbles de l'autre rive sont restés intacts.

Les cheminées contenaient bien de la chaux grasse en pâte molle, mais qui présentait des fissures à travers lesquelles l'eau s'était introduite jusqu'au fil de fer, qu'elle avait altéré.

Lors des premières épreuves faites après la construction du pont, une rupture avait eu lieu, et avait déterminé des crevasses dans l'intérieur des maçonneries, qui s'étaient inclinées à l'avant; ces crevasses s'étaient prolongées jusque dans les cheminées et dans la pâte de chaux, et l'eau, ainsi qu'on l'a dit, s'infiltrant à travers ces crevasses, avait atteint et détérioré les fils de fer, ainsi que le prouvaient les traces d'oxydation reconnues dans la chaux, et ainsi que l'ont prouvé les expériences auxquelles ont été soumis les fils de fer. Ces expériences ont montré, en effet, que les fils, au point de rupture, avaient perdu 1/3 de leur résistance première, tandis que, dans les points où ils étaient intacts, ils l'avaient conservée tout entière.

La commission pense que la chute du pont d'Angers a eu deux causes : la première est la détérioration des fils de fer au point où s'est fait la rupture; et la seconde le passage d'un bataillon de troupe marchant au pas cadencé, et traversant le pont au moment où déjà il éprouvait de fortes oscillations par l'effet d'une violente tempête.

UN MEMBRE est d'un avis tout à fait opposé. On admet, dit-il, que c'est à la perte de 1/3 dans la résistance du fil de fer qu'est due la chute du pont d'Angers; mais cela est impossible, car ces fils, qui avaient encore conservé les 2/3 de leur force, pouvaient encore résister à un effort de 800,000 kil.: or le bataillon, produisant au maximun un effort de 200,000 kilog. sur les câbles, il faut donc admettre que les oscillations seules ont produit un effort de 600,000 kilog., ce qui n'est pas croyable, car alors rien ne pourrait résister, et on ne voit pas de limite à cet effort.

Il pense donc que la tempête a produit sur le plancher un mouvement horizontal qui s'est communiqué aux supports mobiles des culées et a produit sur celles-ci une oscillation transversale; la base du support mobile a échappé de la semelle, le support est tombé sur la maçonnerie de la hauteur de la semelle, qui peut être de $0^{m}.40$ à $0^{m}.50$; il en est résulté un choc violent qui a rompu le câble à la partie altérée, et le plancher du pont est tombé. Il cite pour exemple deux ponts à supports mobiles, l'un sur la Durance, l'autre sur la Marne, près Paris, qui sont tombés sous les efforts de violents ouragans et alors que personne ne les traversait.

Pour éviter ces accidents, on rend maintenant les semelles solidaires des maçonneries au moyen de boulons qui pénètrent dans celles-ci jusqu'à 2 mètres de profondeur; on rend les fléaux solidaires des semelles par des brides qui n'empêchent en rien le mouvement angulaire dans le sens de la longueur du pont; on rend enfin les deux fléaux d'une même pile solidaires entre eux en les réunissant à la partie supérieure par une traverse, en fer, en fonte ou en bois. Jusqu'à présent les ponts disposés ainsi n'ont éprouvé aucun accident.

LE RAPPORTEUR répond que des faits certains viennent contredire ce qui vient d'être dit, puisque, au dire des soldats restés sur les culées, on a entendu d'abord un bruit analogue à celui d'un feu de peloton mal nourri qui provenait évidemment de la rupture du câble, et que ce n'est qu'après l'audition de ce bruit que le fléau, et par suite le pont, sont tombés.

UN MEMBRE explique pourquoi le support mobile n'a pu tomber qu'après la rupture du plancher. Le support était entouré d'un cadre en fonte qui formait pilastre. Quand le support est descendu de la semelle, le plancher est descendu d'autant; la secousse a rompu le câble, qui est venu se placer contre le cadre en fonte. Le plancher n'étant plus soutenu, les pièces de bois qui le composaient se sont rompues successivement, et ont produit un bruit qui a pu être pris pour un feu mal nourri, et la chute complète du plancher a entraîné rapidement le câble, a renversé le cadre et le support.

Le point où le câble s'est rompu était à 15 mètres de distance du support, il était en contre-bas du sol de $3^{m}.50$ dans une cheminée garnie de chaux; la rupture n'a pu être entendue, et, eût-elle produit du bruit, son effet ne peut être comparé à celui de la rupture du plancher du pont.

LE RAPPORTEUR maintient que les pièces du plancher ne se sont pas rompues, et que le bruit s'est fait entendre dans l'intérieur du puits.

On demande si la commission admet que, dans des circonstances analogues, alors qu'un pont suspendu sera traversé par une agglomération de personnes marchant au pas cadencé, soit volontairement, soit involontairement, et par l'effet des oscillations même du pont, les efforts créés sur les points d'attache par les oscillations dépasseront la résistance de ces points.

LE RAPPORTEUR répond que tel est l'avis de la commission; que la chute n'a pas été due seulement à la charge, mais à la charge accompagnée des oscillations, lesquelles ont produit des efforts bien plus considérables que ceux obtenus par les épreuves à 200 kilog. par mètre carré de plancher.

On réplique que, si l'on admet qu'il en soit ainsi, et que la présence des supports mobiles ait augmenté les proportions de l'accident, il en faut conclure que les ponts suspendus présentent des dangers, et que ces dangers sont plus grands encore lorsque l'on emploie des supports mobiles, et enfin que ces ouvrages sont plus altérables qu'on ne le supposait, puisqu'une simple diminution de 1/3 dans la résistance en peut occasionner la chute. Il demande si la Commission conclut seulement à un bon entretien des fils.

LE RAPPORTEUR répond qu'il ne faut pas être trop absolu; que le pont d'Angers se trouvait dans les plus mauvaises conditions : il n'avait qu'un seul câble de chaque côté. S'il en avait eu deux, la présence du second eût pu diminuer beaucoup les chances et les effets de l'accident. Chaque câble

était divisé en six faisceaux, ce qui est mauvais, à cause de la plus grande surface présentée à l'action de l'air extérieur et à la facilité donnée à l'infiltration de l'eau dans l'intérieur du câble. Ces six faisceaux étaient divisés en seize dans la partie noyée dans les maçonneries, c'est-à-dire précisément dans l'endroit le plus altérable et où les fils, pour résister aux effets que nous venons de signaler, auraient eu besoin d'être le plus resserrés. Les fléaux mobiles n'étaient pas réliés, et enfin les maçonneries présentaient des fissures qui s'étaient propagées jusque dans l'intérieur de la pâte de chaux, qui ne pouvait être visitée. Il y a donc là un vice de construction et défaut d'entretien. Il dit ensuite qu'il ne faut pas comparer les ponts suspendus à des ponts fixes, les ponts suspendus étant de véritables machines qui n'ont été inventées que pour remplacer les bacs dans les endroits où il eût été trop difficile ou trop coûteux d'établir des ponts fixes. Ils doivent être soumis à un entretien sérieux et à quelques précautions de passage. Ainsi, les troupes, soit à pied, soit à cheval, ne doivent les traverser que par files, en rompant le pas. On ne doit pas y laisser circuler des masses trop considérables de piétons ni des voitures trop lourdement chargées, lancées au galop.

UN MEMBRE trouve qu'avec de telles précautions les ponts suspendus seraient de pauvres constructions. Il ne croit pas toutes ces précautions indispensables, et il pense que la chute du pont d'Angers a été due à la faiblesse de ce pont et à sa construction vicieuse. Tous les ponts construits comme lui succomberaient. Il ne faut pas chercher à dépenser le moins possible dans l'établissement de ces constructions.

Il fait observer que de toute cette discussion il faut conclure que rien n'est indiqué de sérieux dans les moyens d'éviter la chute des ponts suspendus, construits suivant les habitudes actuelles.

On ne peut pas admettre les restrictions sur le passage sans fixer les limites de ces restrictions. L'intensité des oscillations sera très différente par un temps calme ou par un vent violent avec le même nombre d'hommes. Ces oscillations provenant d'une cause volontaire ou forcée dépassant la résistance des fils, ce n'est pas non plus dans les moyens de conservation des fils qu'il faut chercher le remède.

Le sort du pont d'Angers attend les ponts construits en très grand nombre dans le même système. La cause gît dans la manière fâcheuse dont l'art a dévié de sa route naturelle sous l'influence des règles administratives.

Dans la prochaine séance, c'est sous ce point de vue important que ce membre a l'intention de traiter la question de la chute du pont d'Angers.

TRAVAUX DE L'INSTITUT DES INGÉNIEURS CIVILS ANGLAIS.

UN MEMBRE communique à la Société un compte-rendu des travaux de l'Institut des ingénieurs civils anglais, dans lequel il est question d'un mémoire de M. S. Clegg sur les fondations naturelles et artificielles.

Quoique les termes *naturel* et *artificiel* soient assez explicites, M. Clegg a pensé qu'il était nécessaire de définir distinctement la nature des fondations naturelles, c'est-à-dire des terrains qui possèdent une force suffisante pour supporter les pressions qui peuvent leur être imposées, aussi bien que la nature des différentes sortes de fondations artificielles dont on fait usage

quand le terrain est d'une densité inégale, sujet à l'action de l'eau ou bien assez peu solide pour ne pouvoir supporter le poids dont on veut le charger.

Les fondations naturelles sont généralement des couches régulières de rochers, quelquefois de graviers, de sable sec, d'argile pure et d'autres terrains compactes. Le plus remarquable exemple d'une construction élevée sur un rocher isolé à couches régulières est le phare d'Edystone. Dans cette construction, le frottement des bancs ou des couches est suffisant pour empêcher le mouvement de la construction; mais, dans une localité plus septentionale, où le froid peut graduellement détruire la cohésion, il serait nécessaire de bâtir sous l'eau avec précaution, sur un rocher isolé et faisant un angle avec l'horizon.

On emploie les choches à plongeur pour exécuter les fondations dans des eaux profondes. A une moindre profondeur, le sable et la vase sont dragués, en laissant intacte la surface du rocher; une couche de pierres plates est alors étendue jusqu'à la hauteur des basses eaux du printemps; on nivelle ensuite la surface, et l'on commence les travaux de maçonnerie hydraulique.

Pour des constructions exigeant encore plus de soins, comme, par exemple, une jetée, un pont, le lit est mis à sec au moyen d'un caisson construit, par exemple, comme celui dont on s'est servi pour creuser le rocher sur la rivière de Ribble. Si cependant la pierre est assez abondante et l'espace suffisant, l'ouvrage peut être exécuté avec la pierre perdue, comme, dans les rades de Plymouth et de Cherbourg, la jetée d'Aberdeen et celle de Portland.

L'argile dure ardoisée peut être considérée d'neu dureté égale à celle du rocher si la fondation est assez éloignée de la surface pour n'être pas soumise aux influences atmosphériques, et, dans certaines circonstances, l'argile pure peut supporter 5 kilog. 50 par centimètre carré. Les fondations de gravier ou de sable sec peuvent être d'une force suffisante si le lit est égal en profondeur à la largeur moyenne de la fondation : l'eau s'infiltrant à travers le gravier ne causera aucun dégât, tandis que sur le sable elle sera positivement nuisible.

Les moyens employés pour rendre les terrains peu solides capables de supporter un poids donné ou de devenir des fondations artificielles sont : le béton employé dans des caissons; les pilots en bois recouverts d'une plateforme ou de fascines; les pilots métalliques enfoncés dans le sable, en leur donnant soit la forme de vis, soit celle de cylindres pneumatiques.

L'emploi du béton est d'un usage très ancien. Quatremère de Quincy nous dit qu'on en trouve dans les mines et dans les fondations d'édifices égyptiens; et Vitruve, qui écrivait il y a dix-huit cents ans, donne la manière dont les Romains le préparaient et l'employaient.

On en a découvert aussi dans plusieurs temples grecs et dans beaucoup de mines normandes et anglo-saxonnes dans la même contrée.

Cependant, quoique la France n'ait pas cessé de s'en servir, il a été négligé en Angleterre pendant quatre siècles, c'est-à-dire jusqu'à l'année 1800, époque à laquelle M. Ralph Walker l'a employé dans la construction des docks des Indes-Orientales. Bien qu'en Angleterre on ne s'en soit servi que pour des ouvrages sur terre ferme, on peut parfaitement l'employer pour des constructions maritimes.

Dans les constructions des immenses magasins du dock Chatham, on a employé des piliers faits en béton.

L'emploi de caissons a été introduit par Labelye en 1740, qui s'en servit pour les fondations du pont de Westminster; en France, de Cessart s'en est servi pour la première fois, en 1764, pour le pont de Saumur.

Les pilots en bois et les fascines sont sujets à se détruire quand ils sont exposés à l'action de l'air; mais on évite cet inconvénient en les tenant constamment sous l'eau. Quand on doit enfoncer un grand nombre de pilots destinés à former une enceinte continue, il est quelquefois préférable d'enfoncer d'abord les palplanches, puis les pieux, tandis que, dans d'autres circonstances, il faut suivre une marche inverse. Dans le premier cas, les palplanches sont sujettes à dévier; dans le second, le sol entre les pieux n'est pas régulièrement comprimé.

Tous ces systèmes seront probablement remplacés dans quelques années par les pieux à vis de Mittchells et les cylindres pneumatiques de Potts, dont on s'est déjà servi avec succès dans beaucoup de travaux importants. Les premiers ont été successivement employés pour le Fleewood, Belfast, Maplin et le phare de Chapman-Sand, pour la jetée de Courtown, comté de Wexford, pour la construction d'une digue à Portland, et les fondations de plusieurs ponts de chemins de fer et de viaducs.

L'autre système a d'abord été employé pour un pont sur le chemin de fer d'Holyhead; les tubes ont été enfoncés au moyen de la pompe à air à double effet, le pilot s'enfonçant à mesure que le vide se faisait. Dix-neuf tubes de $0^{m}.30$ de diamètre ont été enfoncés, leurs extrémités reposant parfaitement de niveau; on a fixé ensuite sur la surface formée par la tête des pieux une plaque de fonte sur laquelle la pile a été bâtie.

L'expérience a démontré qu'il est préférable de faire des tubes d'un grand diamètre, et maintenant on en emploie qui ont $1^{m}.50$ et même $2^{m}.10$ de diamètre.

Dans ce cas, la simple aspiration de l'air n'est pas suffisante pour vaincre le frottement des parois. On y a remédié en introduisant entre le tube et la pompe à air un récipient où l'on fait le vide, de sorte qu'on peut, en établissant une communication entre ce récipient et le tube, produire un double effet, d'abord l'épuisement de l'air, comme précédemment, et ensuite un coup sur la tête des piles. Une modification de ce procédé a été employée au pont de Rochester, où les cylindres ont été employés comme des cloches à plongeurs; on a refoulé l'eau, et l'on a opéré le creusement à l'intérieur par un travail manuel. Ce procédé est préférable quand les cylindres ne peuvent pas descendre dans un fonds rocheux.

SÉANCE DU VENDREDI 4 JUILLET 1851.

Présidence de M. POLONCEAU, *vice-président.*

Suite de la discussion sur la construction des ponts suspendus.

LE RAPPORTEUR rappelle que la commission a attribué la chute du pont d'Angers à des vices de construction, à des détériorations dans les maçonneries et à un défaut d'entretien.

Il ajoute que les ponts suspendus ne peuvent pas être comparés aux ponts fixes. Il ne faudrait pas conclure de la chute d'un pont suspendu qu'il n'y a plus lieu de construire des ponts de cette espèce; les accidents graves arrivés sur les chemins de fer et sur les bateaux à vapeur empêchent-ils qu'on se serve de ces moyens de transport? En sillonnant la France de voies de communication qu'il eût été impossible d'établir avec des ponts fixes, parce que la dépense eût été trop considérable, l'industrie des ponts suspendus a rendu au pays tous les services qu'on devait en attendre.

UN MEMBRE discute l'influence de l'intervention administrative sur les conditions d'art qui dominent aujourd'hui dans la construction des ponts suspendus.

L'administration a posé des règles; elle a déterminé les limites de l'effort auquel doit résister le métal sous telle ou telle forme, fil, lame ou barre. On a appelé cette limite, qui est du tiers au cinquième de l'effort de rupture, *coefficient de sécurité*. Elle a en outre fixé la nature de l'effort : c'est une tension progressive croissant lentement sous une certaine charge d'épreuve.

Quant à la limite de l'effort auquel le métal doit être soumis, elle devait être modifiée par le système de construction même. Elle est trop faible pour une certaine forme de câble, trop forte pour une autre forme, suivant le plus ou moins d'égalité de tension de chaque brin dans le faisceau. Le fer en barres à articulations soudées doit moins supporter que le fer dont l'articulation vient au laminoir avec la barre. Il est nuisible pour l'art de lier par la même règle deux constructions dont l'une est vicieuse et l'autre bonne.

Quant à l'épreuve par la tension progressive sous une certaine charge, elle a l'inconvénient de n'être en rien semblable à celles que produisent la circulation et l'influence de l'atmosphère. Il est maintenant prouvé par l'expérience que le vent, le pas cadencé, le passage de lourdes charges, déterminent des oscillations dont l'effort dépasse la limite de résistance de l'épreuve administrative. Les règles administratives sont donc encore ici nuisibles au développement de l'art, parce qu'elles lui ôtent à la fois sa liberté et la règle

de cette liberté, qui est la responsabilité directe et le contrôle de l'opinion publique.

Trois opinions se sont produites dans la discussion. Les défenseurs de l'une, et ce sont ceux des ponts suspendus quand même, ne considèrent pour règle que la dépense ; ils la veulent la moindre possible, et l'on peut admettre qu'ils ont raison, puisque, quand un pont résiste à l'épreuve, son constructeur est couvert par une réglementation qui le décharge de toute responsabilité ultérieure.

Les autres pensent que les progrès de l'art des ponts suspendus en France sont tels qu'on peut considérer ces constructions comme supérieures à celles des pays étrangers.

D'autres enfin pensent que la construction des ponts suspendus est vicieuse, qu'elle a dévié de sa véritable direction par suite de la réglementation administrative ; le contrôle administratif lui-même est impuissant, puisqu'on voit, par l'exemple du pont d'Angers, que des ponts suspendus peuvent tomber même après que des épreuves auraient constaté leur solidité.

Les ponts suspendus ne doivent pas être, comme on l'a dit, construits seulement là ou de faibles ressources ne permettent pas d'établir des ponts fixes ; ils doivent pouvoir être placés dans les localités populeuses et là où des difficultés de passage, nécessitant un espace considérable entre les points d'appui, les rendent préférables à tout autre.

Ainsi, à Londres, sur la partie la plus belle et la plus fréquentée du bassin de la Tamise, l'établissement d'un pont fixe eût certainement créé des difficultés à la navigation. Brunel, en construisant le pont d'Hungerford, a concilié les besoins d'une grande circulation à travers la rivière avec ceux de la navigation.

C'est ainsi qu'on devra construire des ponts suspendus sur les fleuves tels que la Loire, dont les passes ne sont pas réglées, dont le fond est mobile et dont la navigation se fait à la voile ; c'est ainsi qu'on devra en établir sur les cours d'eau torrentiels et sur ceux où les points d'appui devront être très éloignés du cours d'eau lui-même.

Les ponts suspendus ne sont donc pas une spécialité des passages peu fréquentés, et il peut se rencontrer, au contraire, maintes circonstances dans lesquelles il soit utile de les adopter sur des points où se produit une grande circulation.

Or, tels qu'ils sont actuellement construits, ils ne peuvent suffire à ces exigences. L'art de les construire a été entravé dans son développement, et ces entraves résident uniquement dans ce fait qu'il suffit qu'un pont ait résisté à une épreuve de 200 kilog. par mètre carré de plancher pour être accepté et pour que son constructeur soit dégagé de toute responsabilité. On ne se préoccupe en aucune façon des oscillations ; la réglementation ne l'exige pas. Les épreuves sont, en réalité, plutôt faites en vue des maçonneries qu'en vue de la suspension, que l'on fait toujours plus forte qu'il n'est strictement exigé par le cahier des charges.

Il faudrait que les compagnies fussent intéressées à la durée des constructions ; ce qui n'a pas lieu ordinairement, les concessions étant généralement de courte durée.

Dans les pays étrangers, où les compagnies sont propriétaires à perpétuité

et directement responsables de leurs œuvres, les ponts suspendus sont plus grands, plus forts et plus solides.

Il est certain que, comme on l'a dit, il a été avantageux pour la France qu'on en ait pu faire un grand nombre, et les constructeurs, sous l'empire de la réglementation actuelle, les ont faits aussi bien que possible ; mais c'est la réglementation qui est mauvaise. La critique porte donc sur l'état, non pas sur les constructeurs.

Le meilleur remède à apporter à cet état de choses serait de laisser à l'art toute sa liberté, en maintenant, comme cela se fait dans les pays étrangers, la responsabilité directe.

Nous devons émettre le vœu que la profession d'ingénieur soit émancipée; nous devons réclamer la liberté du travail, l'initiative dans les moyens de construction pour l'industrie relative au transport des personnes et des choses. Cette industrie a été long-temps considérée comme le monopole de l'état; il lui a été enlevé, et il a cherché à le ressaisir par le contrôle. Ce contrôle s'exerce dans de bonnes conditions sur les chemins de fer; il devrait s'exercer aussi largement sur les ponts suspendus.

La responsabilité sera plus dure, il est vrai; le capitaliste sera intéressé à vérifier la construction; l'opinion publique fera sentir son influence, et les constructions seront meilleures. Il faut, en résumé, émettre le vœu que l'administration révise les conditions de réglementation, dans le but de donner au constructeur une plus grande liberté.

LE RAPPORTEUR répond qu'il est d'avis qu'on émette le vœu énoncé par le préopinant, mais qu'il n'est pas d'accord avec lui sur les considérations qu'il a présentées.

D'abord la commission n'a pas restreint l'emploi des ponts suspendus au remplacement pur et simple des bacs ; elle a dit, au contraire, que, lorsqu'on aurait à franchir des cours d'eau dans les localités où la circulation ne peut être que très bornée, où des points d'appui dans le lit même viendraient porter obstacle à la navigation, où la distance à franchir serait considérable, et dans certaines autres circonstances, le principe de la suspension serait toujours préféré sous toute espèce de rapport.

Il n'est pas exact de dire que les constructeurs soient couverts par la réglementation actuelle, et qu'ils n'aient aucun intérêt à la conservation de leur ouvrage, car il y a la responsabilité légale, sous le coup de laquelle les constructeurs et les ingénieurs se trouvent pendant dix ans, et parce que la plupart des constructeurs sont restés actionnaires et concessionnaires des ponts qu'ils ont construits.

LE RAPPORTEUR ajoute que la Commission avait à considérer la question sous des points de vue différents, d'abord sous le rapport de conseils à donner aux ingénieurs, et ensuite sous le rapport de la réglementation.

Sous le rapport des conseils à donner aux ingénieurs, la Commission est entrée dans les plus grands détails pratiques en ce qui constitue l'établissement des ponts suspendus; elle a indiqué tout ce qui lui paraissait bon à suivre pour arriver à une bonne construction; et que c'est sous ce point de vue qu'après s'être rendu compte de ce qui s'était fait en France, en Allemagne et en Suisse, elle avait indiqué le coefficient de sécurité de 1/3 comme règle pratique pour le fil de fer, et de 1/4 pour le fer forgé.

Sous le rapport de la réglementation, la Commission a indiqué que, dans l'origine de la construction des ponts suspendus, il n'avait été imposé aucune limite relativement à la résistance des fers et des fils de fer; que les limites de résistance maxima imposées ultérieurement par l'administration avaient conduit à des résultats fâcheux tout autres que ceux qu'on devait en attendre.

La Commission est d'avis qu'il faudrait laisser aux constructeurs une grande liberté pour les ponts suspendus comme pour tout le reste, mais que cette liberté ne doit pas être aussi absolue en France qu'en Angleterre, parce qu'il est fâcheux de le dire, l'esprit anglais se préoccupe de la solidité, tandis que l'esprit français se préoccupe davantage de l'économie, et que cette préoccupation pourrait nuire à la bonne exécution des travaux.

On répond que les efforts à l'épreuve, ou les coefficients de sécurité, ne sont pas les mêmes dans tous les pays; qu'ainsi, au pont de Fribourg, on a fait supporter aux fils de fer 36 kilog. par millimètre carré, tandis qu'en France on ne leur en fait supporter que 18.

L'administration n'a pas d'ailleurs fixé de coefficient de sécurité, mais une charge par millimètre carré, quels que soient les matériaux, et c'est sur ce point de la réglementation, qui donne un désavantage fâcheux aux fers en barres sur les fils de fer, que l'on a entendu l'attaquer.

Que, sur un passage très fréquenté ou très exposé aux vents violents, on établisse un pont suspendu dont le tablier soit très rigide, la suspension lourde, mais forte, d'un système homogène, où tous les éléments soient intéressés dans l'effort résultant de la charge ou des oscillations, que ce pont soit, en conséquence, lui-même peu susceptible d'oscillations, assurément il inspirera plus de confiance avec un coefficient de sécurité qui portera l'effort du maximun de charge à la moitié du poids de rupture du métal, qu'un pont léger, subissant des oscillations considérables sous l'influence du vent, du passage de quelques personnes ou d'une voiture chargée, et dans lequel le coefficient de sécurité sera du tiers du poids de rupture du métal.

On ne peut dire que la responsabilité directe existe parce que les constructeurs restent intéressés dans la propriété du pont : le constructeur qui reste actionnaire ne court d'autre chance que de voir réduire la valeur de son titre par la chute du pont; mais sa responsabilité vis-à-vis des tiers est nulle.

Si la responsabilité directe existait, et que, la preuve étant donnée, après un accident, de la mauvaise construction ou du mauvais état d'un pont, les tiers pussent rendre les propriétaires responsables du dommage qu'ils ont éprouvé, les actionnaires ne s'intéresseraient qu'à bon escient; ils demanderaient à l'art les conditions de sécurité.

Aujourd'hui l'opinion publique se tait, et l'intéressé s'endort après une épreuve administrative qui a réussi. Pour l'actionnaire, c'est l'*étiquette du sac;* il n'est plus besoin de l'ouvrir pour regarder l'intérieur : l'état s'en est chargé.

Il convient donc que la Société se prononce en faveur du principe de l'affranchissement de l'art en réclamant la liberté de la pensée dans les travaux de l'art de l'ingénieur; loin de craindre la règle, elle la cherche; loin de craindre le contrôle de l'opinion publique, elle veut le rendre efficace; elle demande l'assimilation de l'intervention administrative dans les ponts

supendus telle qu'elle existe dans les chemins de fer. Dans les travaux publics qui ont pour but le transport des personnes et des choses, l'intérêt public est sollicité, d'un côté, par l'intérêt privé, qui y trouve un aliment considérable d'affaires, et, de l'autre, par l'état, qui s'est fait le dispensateur et le directeur omnipotent de ses affaires.

L'intérêt privé, représenté par l'association ; l'état, représenté par l'administration, peuvent abuser de l'intérêt général ; et, ce qui est prouvé jusqu'à ce jour, c'est que les pays où l'on en abuse le moins, ceux où l'intérêt général reçoit les plus grands services de l'association, sont justement les pays où règne la plus grande liberté quant aux conditions du travail, et où l'état se borne au rôle de moniteur de l'opinion publique.

SÉANCE DU VENDREDI 18 JUILLET 1851.

Présidence de M. Auguste Perdonnet, *président.*

Construction des grilles de foyer.

M. Polonceau rend compte d'un mémoire de M. Arson relatif à un barreau de grille de nouvelle forme composé de deux barreaux ordinaires fondus ensemble, de manière à ne former qu'une seule pièce par leur contact à leurs extrémités, ainsi qu'en leur milieu. Le vide entre les barreaux est de 8 mill., pour une épaisseur de 12 mill. ; on pourrait même réduire ce vide à 5 mill., en conservant au barreau la même épaisseur de 12 mill.

Il ajoute que l'expérience démontre qu'il y a avantage à faire des barreaux minces et leurs intervalles étroits, ce qui permet de répartir l'air plus uniformément dans la masse de combustible, et empêche la houille menue de tomber à travers les barreaux. Les barreaux minces ont l'inconvénient de se déformer ; mais le procédé de M. Arson a précisément pour effet d'empêcher cette déformation.

Il y a un obstacle à surmonter dans ce nouveau système de barreau, c'est la difficulté du moulage. Cependant M. Arson en a fait lui-même l'application.

On fait observer que dans les ateliers du chemin de fer du Nord on a renoncé, pour les machines fixes, à l'emploi des barreaux de fonte, qui, trop sujets à se déformer, présentent au bout d'un certain temps des inégalités de vides. On les a remplacés par des barreaux en fer forgé, qui coûtent environ 42 centimes le kilog. Ce prix est le double, il est vrai, de celui des barreaux de fonte ; mais ils durent au moins deux fois plus. On peut les faire

de toutes dimensions, et, lorsqu'ils ne peuvent plus servir comme barreaux, ils ont encore une certaine valeur comme métal.

UN MEMBRE appuie ce qui vient d'être dit; il ajoute que ces barreaux de grille coûtent au chemin de fer du Nord 37 centimes seulement. On fournit au constructeur des bouts de rails estimés 15 centimes le kilog., et il rend poids pour poids des barreaux terminés, moyennant un prix de façon de 22 centimes. Quand on lui donne pour la même transformation de vieux barreaux de fer hors de service, il faut lui en livrer 125 kil. pour en retirer 100 kil. de barreaux finis, ce qui élève alors le prix à 40.75 au lieu de 37 centimes, ou, si l'on veut, on peut avoir pour le même prix de 37 centimes les barreaux neufs; mais alors il faut estimer le vieux fer à 12 centimes au lieu de 15 centimes. On trouve donc à utiliser les vieux barreaux *en fer* hors de service, tandis que les vieux barreaux de fonte ne sont acceptés à aucun prix dans le commerce. La vieille fonte en débris *non brûlée* peut seule se vendre, et son prix est alors de 10 à 12 centimes le kil.

UN MEMBRE réplique que les barreaux de fer, qui coûtent le double des barreaux de fonte, ne se vendent pas comme vieux fer beaucoup plus cher que la vieille fonte, dont on peut trouver le placement à 10 ou 11 centimes. Il ajoute que les barreaux de fer minces se déforment autant que les barreaux en fonte.

On appuie sur ces observations, car ces barreaux en fer seraient bientôt brûlés, et le fer brûlé est sans valeur; c'est pour cette raison que les vieilles fontes sont souvent préférées aux vieux fers.

On fait observer que la houille brûle plus le fer que la fonte, et qu'il n'en est pas de même du coke.

UN MEMBRE recommande l'emploi des barreaux dont les extrémités sont taillées en biseau à la partie supérieure, ce qui empêche la déformation par un échauffement inégal. Ces barreaux ont été employés avec avantage dans plusieurs usines à Douai.

On répond que c'est ainsi que sont faits les barreaux de grilles de locomotives.

UN MEMBRE signale les inconvénients présentés par les barreaux minces avec certaines natures de houilles, et même de cokes, dont les scories se collent facilement, et qui ne peuvent être détachées qu'à coups de ringard, qui brisent ou déforment souvent les barreaux minces.

Il a fait lui-même usage de la disposition des barreaux doubles en question. Les barreaux avaient douze mill. d'épaisseur; les interstices avaient également 12 mill.; l'application en fut faite dans un four dormant à réchauffer, alimenté avec du coke. La combustion était meilleure; mais, au bout d'un certain temps, les barreaux avaient été tellement déformés en détachant les scories, qu'on fut obligé de les réformer, et d'en revenir aux anciens barreaux de 25 à 30 mill. d'épaisseur.

Travaux de sondage.

UN MEMBRE, M. Evrard, réclame la priorité à l'égard de certains résultats présentés dans une des dernières séances par M. Goschler, dans son rapport sur les travaux de sondage de M. Kind.

A l'appui de sa réclamation, il dépose sur le bureau des échantillons de terrains analogues à ceux apportés par M. Becquerel à la séance du 23 juin dernier à l'Académie des sciences.

Il expose ensuite la méthode qu'il a imaginée et mise en pratique en 1838 pour découper, au fond d'un trou de sonde, des cylindres de terrains. Il considère ses appareils comme plus complets que ceux de M. Kind au point de vue de l'étude géologique des terrains, parce qu'il fait sur les échantillons, avant de les découper, une marque qui permet de les orienter dans leur position naturelle.

Il a présenté à l'Académie la description de ses appareils, et, dans la séance du 24 février 1840, une commission, composée de MM. Cordier et Beudant, a été nommée pour faire un rapport sur ce sujet. Le rapport n'a jamais été fait ; mais dans cette même année, une notice sur les outils de M. Evrard fut insérée dans les *Annales des Mines* (tome XVIII, page 53). Plus tard M. Combes, dans le Traité d'exploitation des mines qu'il publia en 1844, donna un extrait de cette notice (tome II, page 45).

La même description a été publiée en 1841 dans les mémoires de la Société d'agriculture de Valenciennes (tome III, page 219).

Ressorts de suspension.

Il est ensuite demandé à M. La Salle, qui s'est spécialement occupé de la question des ressorts, auxquels il a apporté des perfectionnements nombreux et importants, de faire connaître le travail de M. Blacher sur les ressorts, et en même temps de donner quelques renseignements sur l'état de la question.

Il dit que le travail de M. Blacher ne doit être considéré que comme une étude purement théorique des moyens que peut présenter la théorie de la résistance des matériaux pour calculer les effets d'un ressort théorique d'un type particulier, et permettre de déduire, par analogie, les dimensions de ressorts semblables ou à peu près semblables qu'on voudrait reproduire.

A ce titre, les formules auxquelles il arrive ne sauraient être rigoureusement applicables aux différents cas qui peuvent se présenter dans les applications, car elles ne tiennent pas compte des nombreuses circonstances pratiques qui sont de nature à modifier les indications générales de la théorie ; elles n'indiquent d'ailleurs pas suffisamment la marche à suivre pour qu'un ressort puisse être calculé de la manière la plus avantageuse relativement aux conditions de son emploi.

Le principe qui forme la base du calcul de M. Blacher est un principe nouveau, ou du moins peu connu des praticiens, qu'on ne trouve dans aucun des ouvrages pratiques qui traitent de la résistance des matériaux, et dont l'application pourra donner lieu à des recherches plus étendues.

Le principe en question est le suivant :

Si l'on considère une barre élastique à section uniforme posée sur deux points d'appui espacés entre eux, et situés à des distances égales par rapport aux extrémités de la barre ; si l'on applique à chacune des extrémités de la barre deux forces verticales égales, M. Blacher démontre que le mo-

ment d'élasticité est constant pour toute la portion de barre comprise entre les points d'appui ; que celle-ci affecte par conséquent, en fléchissant, une courbure exactement circulaire, et que les bras de levier des forces qui sollicitent sa flexion sont égaux aux saillies de la barre, c'est-à-dire à la distance des points d'appui aux extrémités. Il suit de là que, si l'on substitue aux points d'appui les extrémités d'une seconde barre, portée elle-même par une troisième, et ainsi de suite, de manière à superposer les unes sur les autres un certain nombre de barres d'égale épaisseur, d'égale largeur, et présentant des longueurs décroissantes telles que les saillies soient toutes égales entre elles, ces barres fléchiront sous l'influence de la première, en ne se touchant que par les extrémités et en affectant toutes exactement la même courbure circulaire.

Les parties de barres en saillie sur les points d'appui fléchiront également en arcs de cercles si l'on a soin de leur donner la forme des solides d'égale résistance à partir des points de supports.

Ce raisonnement s'applique également à des lames de ressorts cintrées en courbes circulaires de rayons égaux que la charge redresserait.

Il en résulte qu'un ressort qui est composé de feuilles d'égale épaisseur doit avoir tous ses étagements égaux si elles sont cintrées sur la même courbure ; que les feuilles peuvent conserver toute leur épaisseur dans les parties recouvertes, et que les étagements doivent présenter la forme des solides d'égale résistance,

Partant de ce principe, M. Blacher établit d'abord une première formule qui donne les relations existant entre les diverses dimensions d'un ressort, la charge qu'il supporte et la flexion correspondante.

Cette formule, qui est relative à l'état général d'un ressort considéré d'une manière abstraite, c'est-à-dire qu'on suppose toujours capable d'un excès de résistance, donne lieu aux observations suivantes :

1° La flexion est proportionnelle à la charge, c'est-à-dire qu'à chaque addition partielle et constante de charge, correspond une flexion partielle et constante dans toute l'étendue de la flexion.

2° La flexion est en raison inverse du nombre de lames, c'est-à-dire que pour une charge double, il faut, toutes circonstances égales d'ailleurs, un nombre double de lames.

3° La flexion est proportionnelle au cube de la longueur développée du ressort.

4° La flexion est en raison inverse de la largeur et du cube de l'épaisseur des lames.

M. Blacher établit ensuite deux autres formules qui donnent les relations entre la flexion, les divers éléments du ressort, la charge qu'il supporte et la résistance propre à la matière dont il est composé. L'une d'elles donne le maximun de charge que puisse supporter un ressort, et l'autre la flexion correspondante.

Puis enfin il détermine approximativement le poids d'un ressort en fonction, de sès dimensions et du nombre de lames, et il constate par une dernière formule, qui exprime le travail d'un ressort en fonction de ses divers éléments, que ce travail ne dépend que de la qualité d'acier qui le compose, de quelque façon qu'on le distribue.

Après ce résumé du travail de M. Blacher, M. La Salle répète que les formules ne seraient applicables qu'à un ressort théorique qui serait composé de feuilles d'égale épaisseur, ne se touchant que par leurs extrémités, cintrées toutes indistinctement sur un même rayon de courbure, et dont les étagements seraient parfaitement égaux.

Il ajoute que toutes ces conditions ne sont pas rigoureusement réalisables en pratique, soit par suite des difficultés qui en résulteraient pour le travail, soit parce que certaines considérations forcent à les modifier, soit enfin parce que le défaut d'homogénéité de l'acier exige plusieurs artifices qui, en altérant la forme théorique des ressorts, altèrent aussi légèrement les conditions de son jeu.

M. Blacher fait d'ailleurs intervenir dans ses calculs un coefficient de résistance ou de rupture, qui ne peut être déterminé qu'en le déduisant des formules mêmes à l'aide d'expériences directes sur les ressorts; d'où il résulte que, si les ressorts qui ont servi à la détermination de ce coefficient ne sont pas des types parfaits, le coefficient lui-même n'offre pas de garanties suffisantes, et cela d'autant plus que les diverses natures d'aciers employées dans la fabrication des ressorts présentent de très grandes variations dans la limite de résistance à laquelle on peut les faire travailler.

Dans le travail que M. La Salle a lui-même présenté à la Société, il a suivi une autre voie; il a fait intervenir l'allongement proportionnel qui fournit un élément de calcul très convenable, et dont l'exactitude peut être plus facilement vérifiée par l'expérimentation.

Il a observé que l'acier fondu de première qualité pour ressorts était susceptible de subir un allongement de $0^m.003$ sans que son élasticité fût altérée; que de $0^m.003$ à $0^m.005$ l'élasticité n'était altérée que par une première épreuve, et que des épreuves successives n'accusaient pas sensiblement de nouvelle altération; qu'enfin au delà de $0^m.005$ ou $0^m.006$ l'altération se reproduisait indéfiniment jusqu'à la rupture ou la complète déformation.

Il conclut de là que, pour placer un ressort dans des conditions parfaites d'élasticité, il conviendrait de ne pas dépasser la limite d'allongement à $0^m.003$, du moins jusqu'à ce que l'expérience ait positivement démontré qu'on peut aller au delà sans compromettre la durée des ressorts; au reste, en ceci, il faut tenir compte des conditions de l'emploi, et, dans certains cas, on peut pousser plus loin le travail de l'acier.

Il signale que depuis quelque temps on a essayé un nouveau système de ressorts, dits compensateurs, qui sont composés d'un petit nombre de feuilles qui, à mesure qu'elles fléchissent, se déroulent sur une barre rigide. Ces ressorts, qui à la première vue paraissent plus légers que les ressorts ordinaires, sont dans de mauvaises conditions de solidité et de durée, parce que l'acier y travaille à sa plus grande limite, et le plus souvent à un allongement de $0^m.005$, dès que le milieu commence à se dérouler sous l'influence d'une charge quelconque.

Si l'on voulait faire travailler autant l'acier dans les ressorts ordinaires, on réduirait considérablement leur poids, qui deviendrait alors de beaucoup inférieur à celui des ressorts à compensateurs. Selon lui, le principe des ressorts à compensateurs n'est pas rationnel; il leur trouve un vice radical en

ce que leur sensibilité diminue à mesure que la charge qu'il supportent augmente, c'est-à-dire qu'ils perdent leur flexibilité précisément au moment où elle devrait être la plus grande possible. Plusieurs essais ont été faits de ce système au chemin du Nord, au chemin de Strasbourg; il ignore quels en ont été les résultats, mais il ne croit pas qu'ils aient pu être avantageux. Il est prêt, du reste, à répondre à toutes les objections qui pourront être faites, et il prie M. Polonceau, qui a fait récemment quelques expériences comparatives sur les deux systèmes, d'en faire connaître les résultats.

M. POLONCEAU explique que les nouveaux ressorts, se développant sur une barre rectiligne et se raccourcissant de toute la longueur appliquée sur cette barre, offrent un bras de levier de plus en plus petit à mesure qu'ils fléchissent. A la première inspection, il lui avait paru, comme à tout le monde, que, sous une charge déterminée, ces ressorts devaient agir à peu près de la même manière qu'un ressort ordinaire, plus court de toute la quantité en contact sur la barre rigide; l'expérimentation a montré que les ressorts à compensateurs présentaient une élasticité extraordinaire. Il ne veut rien préjuger de la question quant à présent; il s'occupe à déterminer le rendement des nouveaux ressorts; il rendra compte de ses expériences à la Société dès qu'elles seront terminées.

M. LA SALLE indique que le caractère qui distingue essentiellement les deux systèmes est la flexibilité.

Dans les ressorts ordinaires, la flexibilité est proportionnelle à la charge; dans les ressorts à compensateur, au contraire, la flexibililité décroît rapidement à mesure que les bras de leviers diminuent sous l'influence d'une augmentation de charge, puisque la flexion est en raison directe du cube des longueurs.

Dans les expériences faites au chemin de fer d'Orléans, on s'est appliqué à charger d'abord chacun des ressorts soumis à l'essai d'une charge permanente de 2,500 kilog. puis d'une charge additionnelle de 1,000 kilog., qui, étant subitement enlevée à un moment donné, a provoqué une réaction du ressort, qui s'est manifestée par des oscillations plus nombreuses pour le ressort à compensateur que pour le ressort ordinaire.

On en a conclu que le premier était plus élastique. Mais il faut observer que, le ressort ordinaire étant composé d'un plus grand nombre de feuilles, il a à vaincre des frottements plus considérables; que, par conséquent, ses oscillations doivent s'éteindre plus rapidement. Suivant lui, ce frottement des feuilles est une qualité lorsqu'il n'est pas exagéré, parce qu'il empêche précisément que les oscillations se perpétuent. Un ressort ne doit pas être absolument élastique, la condition principale est qu'il soit flexible; quant au frottement, il absorbe à son profit une partie du travail développé par le choc.

UN MEMBRE n'est pas du même avis quant au frottement: car, si l'opinion de M. La Salle était exacte, les anciens ressorts seraient excellents, et il n'en est rien. Les ressorts doivent avoir une grande flexibilité, ils doivent fléchir beaucoup quand ils sont très chargés; le frottement doit nuire à cette flexibilité.

M. LA SALLE répond que, si le frottement est utile dans une certaine limite il ne faut pas qu'il soit excessif, comme dans les anciens ressorts. Pour être doux, un ressort doit être flexible et produire des oscillations d'amplitudes déterminées: il ne faut donc pas que le frottement soit assez considérable

pour détruire la flexibilité du ressort ; c'est pour cela qu'il y a intérêt à faire faire les ressorts le plus longs possible, parce que, ceux-ci pouvant être composés d'un moins grand nombre de feuilles, ils présentent moins de surface de frottement. Mais il y a des cas où trop d'élasticité devient nuisible.

Il a exécuté pour les messageries des ressorts composés de 5 à 6 feuilles de 10 millimètres d'épaisseur. Ces ressorts étaient très doux sous de fortes charges ; mais ils l'étaient moins lorsque les voitures étaient à vide, et leur occasionnaient dans l'un et l'autre cas un grand balancement. On a depuis lors substitué à ces ressorts d'autres ressorts, composés d'un plus grand nombre de feuilles, plus minces, qui présentaient sensiblement la même flexibilité et le même poids. Ces derniers, qui présentaient plus de frottement, ont été préférés.

UN MEMBRE demande si l'effet que l'on attribue au frottement ne doit pas être plutôt attribué à la charge initiale que l'on donne au ressort. On a cherché à diminuer l'amplitude des oscillations, et, pour cela, on a donné aux ressorts une tension initiale équivalente à une certaine charge, pour un poids correspondant, au poids d'une voiture vide et d'une portion du poids des voyageurs, de telle sorte que l'abaissement du wagon à l'entrée des voyageurs était peu sensible : c'était déjà une amélioration, et pour les tampons et pour les oscillations verticales. Maintenant on veut faire plus, on cherche à donner aux ressorts de plus grandes amplitudes d'oscillation, et l'on demande au frottement de servir, pour ainsi dire, de frein à ces oscillations. Il faut faire des ressorts tels que la charge qu'ils ont à supporter les fasse varier entre deux et trois millimètres : ils donneront alors tout à la fois des oscillations courtes et un bon travail.

M. LA SALLE répond que la douceur d'une suspension dépend de la flexibilité des ressorts ou de l'amplitude des oscillations qu'ils sont susceptibles de prendre dans leur jeu, et qu'on ne peut diminuer ces quantités sans nuire à la douceur de la suspension. Que se passe-t-il dans les ressorts des chemins de fer, et en général dans tout ressort destiné à suspendre un véhicule quelconque ? Le ressort est d'abord chargé d'un poids permanent, et c'est sous l'action des mouvements imprimés à cette charge permanente par l'action des forces extérieures que son équilibre est troublé. Ces forces extérieures ont-elles jamais pour effet de diminuer la tension du resort ? Bien certainement non ! Elles tendent au contraire à augmenter la flexion, à imprimer momentanément une flexion plus grande que la flexion initiale provoquée par la charge permanente au repos. Les expériences du chemin de fer d'Orléans ne donnent donc point l'idée de ce qui peut se passer sous l'influence d'un choc ; elles montrent tout au plus comment chacun des deux ressorts réagit.

En effet, tout choc ou toute cause extérieure qui vient troubler l'allure régulière d'un véhicule en mouvement détermine une quantité de travail négatif qui est en quelque sorte dérobé au travail utile de la traction, et qui se manifeste par des mouvements différents du mouvement régulier de translation.

Le choc est d'ailleurs une cause de perturbation inévitable, parce qu'elle tient à des défauts inhérents à la voie. On ne peut donc anéantir les chocs,

il faut nécessairement qu'ils se produisent; mais on peut transformer les mouvements brusques et instantanés qu'ils engendrent; on peut transformer le travail de dislocation qu'ils déterminent en un mouvement moins brusque, en un autre travail équivalent qui ne disloque pas et n'incommode pas le voyageur.

C'est là précisément le rôle que les ressorts sont appelés à jouer; ils doivent déterminer un travail de balancement ou d'oscillations verticales propres à allonger la durée du choc. L'amortissement du choc n'a lieu que par les mouvements que prennent les véhicules autres que celui de translation directe dans le sens de la marche. Si ces mouvements se font brusquement dans de courts espaces, ils se traduisent en secousses plus ou moins violentes qui tendent à disloquer l'économie du système mis en mouvement; si au contraire ils prennent plus d'espace, la durée de leur action s'allonge, et ils se transforment en balancement plus doux. Or, comme cet espace est précisément dû aux ressorts interposés entre la voie fixe et la masse en mouvement, il faut que ceux-ci soient très flexibles pour produire de bons effets.

Pour rendre la chose plus intelligible, qu'on suppose deux ressorts, l'un très flexible, l'autre très peu flexible; qu'on laisse tomber sur chacun deux un même poids d'une certaine hauteur : le premier ressort, obéissant à l'action de cette masse en mouvement, s'affaissera d'une grande quantité, tandis que le second s'affaissera à peine. Il est clair que, dans le premier cas, le choc sera mieux amorti, ou, si l'on veut, mieux transformé que dans le second. Dans le premier cas, la vitesse du corps qui tombe s'éteindra graduellement, en y mettant le temps que le ressort met à fléchir; dans le second cas, le passage du mouvement au repos sera presque instantané.

Il est d'ailleurs évident que, lorque la flexion est arrivée au bas de sa course, le choc est amorti, et que, si le ressort était capable de se tenir en repos à ce moment, il présenterait les meilleures conditions comme appareil amortissant; mais, en raison de l'élasticité propre à la matière qui le compose, il se trouve bandé; il demande à revenir à sa forme primitive, à remette par conséquent la masse en mouvement, parce qu'il devient à son tour force agissante : il crée donc d'autres mouvements complétement inutiles pour l'amortissement du choc, mais qui sont inévitables, parce qu'il est urgent que le ressort soit en état de reprende sa forme pour être capable de fonctionner de nouveau.

L'élasticité est donc une qualité essentielle pour la matière qui compose le ressort, afin que celui-ci se trouve continuellement en état de fonctionner; mais la qualité essentielle pour amortir le choc est la flexibilité. La réaction est utile pour préparer le ressort à de nouveaux chocs, elle est une conséquence nécessaire de l'élasticité de la matière qui constitue le ressort; mais elle est inutile pour l'amortissement, elle perpétue au contraire des mouvements qui n'auraient pas lieu si elle n'existait pas. Tout cela prouve suffisamment que le frottement n'est point une condition nuisible quand il ne s'oppose pas à la flexibilité du ressort; au contraire, il absorbe à son profit une portion du travail amortissant, et il s'oppose à ce que les réactions soient aussi vives ou aussi nombreuses, parce qu'il les amortit à son tour.

Or, dans les chemins de fer, on ne peut exagérer la flexibilité des ressorts; elle se trouve limitée, parce qu'on ne peut admettre des différences de niveau

de plus de 3 à 4 centimètres entre des wagons qui se succèdent dans un train et qui sont inégalement chargés ; il importe avant tout que les tampons ne puissent être faussés par les chocs.

A l'époque où l'on a établi le matériel du chemin de fer de Tours à Nantes, les ressorts de suspension de voitures du chemin de fer du Nord avaient une flexibilité d'environ 6 mill. par 100 kilog. ; l'affaissement des tampons sous la charge additionnelle de voyageurs était par conséquent de 35 à 40 mill. Cette suspension laissait beaucoup à désirer. Pour obtenir une suspension plus douce que celle du chemin du Nord, il s'agissait de faire des ressorts plus flexibles : on porta cette flexibilité à 12 mill. par 100 kilog., et, pour éviter un abaissement des tampons, qui eût été de 70 à 80 mill. si la charge eût été directement appliquée sur le ressort, on les mit en place sous une tension initiale égale à la charge totale qu'ils devaient porter. Il est résulté de cette disposition que l'affaissement des tampons a été réduit de moitié, et que l'on a obtenu une suspension d'autant plus douce que la voiture est plus complétement chargée. C'est un artifice qui a été employé pour remédier à l'abaissement du niveau des tampons, et non point, comme on l'a dit, pour diminuer l'amplitude des oscillations.

Dans les voitures de Tours à Nantes, au contraire, l'amplitude des oscillations qui se manifestent durant la marche est plus grande qu'au chemin du Nord, et c'est uniquement à cela qu'on doit attribuer le plus de douceur de la suspension.

La sensibilité des ressorts est telle, qu'un seul voyageur, en se remuant avec force sur un marche-pied, imprime à la voiture un grand balancement, tandis qu'au chemin du Nord il peut à peine lui imprimer un mouvement apparent.

Bandages sans soudure.

UN MEMBRE rappelle ensuite l'attention de la Société sur les nouveaux bandages sans soudure de MM. Petin et Gaudet. Des bandages de cette nature fournis au chemin de fer du Nord ont pu être appliqués absolument sans tournage. Une seule difficulté s'est présentée pour l'emploi de ces bandages à tous les chemins de fer, c'est la différence de profil, qui exigerait un nombreux matériel, tandis que, si tous les chemins pouvaient adopter le même profil, le coût des bandages pourrait être beaucoup diminué.

SÉANCE DU 1er AOUT 1851.

Présidence de M. POLONCEAU, *vice-président.*

Construction des locomotives. — Echappement variable. — Qualité relative des cokes.

M. LA SALLE rend compte de la notice qu'il a déposée le 6 décembre 1850, relative à l'échappement variable à orifice annulaire.

Il expose que l'échappement dont il s'agit date de 1845 : à cette époque, les machines locomotives étaient loin d'avoir le grand développement de surface de chauffe qu'elles ont aujourd'hui ; le coke employé était de médiocre qualité ; on ne faisait pas alors usage du coke lavé ; les machines ne produisaient pas aussi facilement la vapeur, et l'échappement variable était peut-être la ressource la plus importante que le mécanicien eût à sa disposition pour la conduite de sa machine. Il y avait donc tout intérêt à perfectionner un organe aussi essentiel.

La question ne présente peut-être plus aujourd'hui le même degré d'intérêt ; cependant l'utilité d'un perfectionnement réel serait incontestable : l'échappement est une des parties qui ont été le moins étudiées et sur lesquelles il reste le plus à faire. M. La Salle espère qu'il pourra être de quelque intérêt pour la Société de connaître le résultat de ses études à cet égard.

Son mémoire fut rédigé il y a trois ans, et présenté à M. Polonceau, qui voulut bien faire l'application de l'échappement à orifice annulaire à une machine à marchandises.

L'appareil fonctionna pendant une couple de mois, et parut donner de bons résultats. On essaya plus tard de replacer l'ancien échappement ordinaire à clapets pour comparer les deux systèmes ; mais les préoccupations du service du chemin d'Orléans, qui s'organisait sur de nouvelles bases, empêchèrent de donner suite à ces essais. Aujourd'hui ils vont être repris de nouveau avec une machine à voyageurs.

L'échappement variable à orifice annulaire proposé par M. La Salle est fondé sur ce principe, que le tirage produit par un jet de vapeur est dû au frottement de la colonne de vapeur sur l'air ambiant, lequel se trouve ainsi entraîné par une force proportionnelle à la résistance qu'il oppose.

Par suite, plus la colonne de vapeur qui s'écoule présentera de surface frottante, plus y aura d'air directement entraîné, et il doit être avantageux d'augmenter le périmètre de la section de l'orifice d'échappement, sans toutefois augmenter cette section.

L'appareil que propose M. La Salle pour atteindre ce but est tout simplement un tuyau à section annulaire formé de deux tubes concentriques auquel viennent aboutir, en s'évasant et en s'aplatissant successivement, de manière à conserver sensiblement la même section, les deux tuyaux de dégagement.

Ceux-ci viennent se raccorder à la partie inférieure du tuyau annulaire dont chacun d'eux embrasse la moitié de la section inférieure. L'air ou les gaz arrivent autour de l'orifice annulaire, en longeant les surfaces extérieures des deux tubes concentriques.

L'appareil ainsi disposé présente assez d'analogie avec une lampe à mèche cylindrique dont la flamme figurerait le jet de vapeur.

La paroi extérieure du tuyau annulaire est renflée vers son milieu de manière à présenter sur le sommet une pente conique, et dans l'intérieur du tuyau se trouve un régulateur également conique et annulaire qui, se mouvant verticalement le long du tube cylindrique intérieur, vient rétrécir à volonté l'orifice de l'échappement.

Ce régulateur peut être facilement manœuvré par un système de leviers placés en dessous de l'échappement; il est, à cet effet, ménagé au régulateur une entretoise qui s'engage dans les deux coulisses pratiquées à la paroi inférieure du tuyau annulaire.

Ainsi disposé, en conservant sensiblement la même section pour l'écoulement de la vapeur, l'échappement à orifice annulaire présente un périmètre trois fois plus grand que celui de l'échappement ordinaire; et, en faisant varier les positions du régulateur, les périmètres décroissent rapidement dans l'échappement ordinaire et restent sensiblement les mêmes dans l'échappement à orifice annulaire, en sorte que, par exemple, pour la position du régulateur qui réduit la section de moitié, les périmètres se trouvent être dans le rapport de 1 à 4.

UN MEMBRE a rendu compte de l'expérimentation qui a eu lieu de l'échappement à orifice annulaire dont l'application a été faite, au chemin de fer d'Orléans, à une machine à marchandises à six roues couplées.

Pendant le mois de mai qui précéda cette application, cette machine a consommé, avec l'échappement ordinaire à clapets et avec sa cheminée de $0^{m}.33$ de diamètre intérieur, $9^{k}.11$ par kilomètre, sur un parcours de 968 kilomètres.

Pendant les mois de juin et de juillet, la même machine a fonctionné avec l'échappement annulaire et une cheminée de $0^{m}.40$; le parcours a été de 3,146 kilomètres, et la consommation moyenne de $8^{k}.48$ par kilomètre.

Dans le courant du mois d'août, l'échappement ordinaire a été replacé, en conservant la cheminée de $0^{m}.40$; la machine a fonctionné successivement avec les deux échappements, et la consommation moyenne du mois entier est remontée à $9^{k}.01$, sur un parcours de 1,694 kilomètres.

Enfin, le mois suivant, elle s'est élevée à $9^{k}.60$ par kilomètre pour un parcours de 8,170 kilomètres, effectué en totalité avec l'échappement ordinaire et la cheminée de $0^{m}.40$.

Les conditions de service et de charge remorquée ont été les mêmes pendant toute la durée de la marche avec les deux systèmes d'échappement.

La différence de consommation à l'avantage de l'échappement annulaire,

quoique apparente, n'est cependant pas assez importante pour qu'on puisse l'attribuer entièrement au système de l'échappement. Il est certain que la consommation d'une machine varie souvent dans des limites plus larges sans qu'aucun changement y soit apporté; mais il est un fait important à constater, c'est que pendant tout le temps que cette machine a fonctionné avec l'appareil de M. La Salle elle s'est tenue au premier rang parmi celles de même type qui ont circulé dans les mêmes circonstances.

La marche de la machine avec l'échappement annulaire a donné lieu à cette observation, que la production de vapeur est plus abondante qu'avec l'échappement ordinaire pour la même section de sortie.

La conséquence naturelle à tirer de ce fait serait un plus grand effet utile de la vapeur employée comme tirage.

Au reste, l'appareil de M. La Salle avait, à peu de chose près, les mêmes proportions que l'appareil ordinaire. La machine a presque constamment fonctionné avec l'échappement grand ouvert, et tout porte à croire que, si ce dernier eût pu fournir une section plus grande, on eût pu en tirer avantage pour diminuer la contre-pression.

Les résultats obtenus dans cette première expérience sont de nature à encourager à faire de nouveaux essais. Il faut espérer que, si du premier jet, l'échappement annulaire s'est placé au premier rang, on arrivera par une série d'expériences, en variant le diamètre de la cheminée, en variant aussi les proportions de l'appareil, à améliorer d'une manière plus notable encore les résultats.

L'entraînement des gaz dans la cheminée est beaucoup plus énergique à travers le tube intérieur qu'autour du tube extérieur; ce fait semble indiquer la nécessité d'augmenter la section du passage des gaz par le milieu de l'échappement, afin d'équilibrer les vitesses.

Il termine son rapport en disant que, comme prix de revient et comme facilité de construction, l'appareil annulaire est plus avantageux que l'échappement à clapets. Il peut être appliqué avec facilité à la plupart des machines et être manœuvré très commodément par un mécanisme simple et pratique.

Le prix de revient d'un appareil complet peut être évalué à 92 fr. pour l'échappement à orifice annulaire, et à 103 fr. pour un échappement ordinaire de mêmes proportions, les frais généraux étant appliqués, dans l'un et l'autre cas, à raison de 75 0/0 sur la main-d'œuvre.

A ces observations M. La Salle ajoute qu'il ne croit pas que le changement d'un seul organe, bien qu'il comportât un perfectionnement notable, puisse accuser des résultats bien tranchés.

Dans une machine, tous les organes, tous les éléments de sa constitution, se lient étroitement entre eux; un changement apporté à l'un des plus importants doit nécessairement provoquer des modifications aux autres, pour établir l'harmonie qui doit exister entre leurs différentes fonctions.

Ce n'est d'ailleurs pas du premier coup qu'on peut espérer, surtout en l'absence de toute donnée expérimentale, d'atteindre le meilleur résultat ou le plus haut degré de perfectionnement que peut comporter un principe.

UN MEMBRE aurait désiré que les expériences faites avec l'échappement de M. La Salle et la cheminée de $0^m.40$ eussent été reprises avec la pre-

mière cheminée de 0m.33 ; il pense que les cheminées trop grandes peuvent produire de mauvais effets, et que, dans tous les cas, les cheminées doivent être appropriées aux échappements.

UN MEMBRE rappelle que l'on a fait une triple expérience, dont les deux dernières parties ont été faites avec la même cheminée de 0m.40, et chacun des deux échappements comparés ; toutes ces expériences ont d'ailleurs été faites par le même mécanicien.

Ce membre explique qu'au chemin de fer d'Alsace on a fait d'abord un essai en prenant un jet de vapeur sur la chaudière d'une machine fixe, et, le lançant dans une cheminée au bas de laquelle on plaçait sur le doigt des corps de différents poids, on a trouvé que la vapeur sortie de l'échappement annulaire enlevait des poids qui ne pouvaient être soulevés en employant les autres échappements.

Cependant il n'est pas aussi exclusif que M. La Salle au sujet de l'entraînement de l'air par le frottement seul ; il pense que l'influence de l'épanouissement qui ferait agir la vapeur comme un piston doit être prise en considération.

Selon lui, un jet intermittent donne, par l'effet du piston, de bien meilleurs résultats qu'un jet continu. L'un des effets principaux de l'échappement annulaire est d'augmenter l'épanouissement et de produire un appel plus fort au centre qu'à la circonférence.

Il ajoute qu'en faisant des cheminées polies et à rivets brasés on augmente beaucoup le tirage, et qu'il faut toujours éviter les frottements dans l'intérieur des cheminées ; tout obstacle, toute valve placée dans un jet de vapeur, nuit à son écoulement, et l'on améliore beaucoup les échappements par le seul adoucissement des coudes des tuyères.

UN MEMBRE ne croit pas qu'il y ait là rien d'absolu ; les meilleurs échappements, au chemin de fer du Nord, sont ceux qui, par la même section d'échappement, donnent le plus de surface frottante, et les contournements peuvent se rencontrer à la seule condition que les angles soient assez doux ; il est avantageux de diriger long-temps la vapeur dans le sens de l'échappement, en ne faisant pas, toutefois, rencontrer trop directement les jets des deux tubes.

UN AUTRE MEMBRE pense que l'on doit surtout éviter les remous, qu'ils soient produits par un changement brusque de forme ou par la rencontre d'un obstacle.

On ajoute que les échappements de l'*expansion* sont avantageux en ce qu'ils n'obstruent nullement les cheminées.

M. LA SALLE les trouve trop grands, et pense qu'ils détendent trop la vapeur.

On fait observer que les avantages signalés dans les échappements à tubes contournés du chemin de fer du Nord ont peut-être pour cause une élévation de la température produite dans les tubes, qui circulent à l'intérieur, au lieu de circuler à l'extérieur, comme dans les autres systèmes. Cette élévation de température, tout en augmentant le volume de la vapeur et augmentant par conséquent la durée de l'écoulement, peut aussi, par le travail moléculaire qui se produit et par la vaporisation de l'eau entraînée occasionner une accélération de vitesse.

UN MEMBRE croit que la vitesse d'écoulement est trop grande pour que les effets supposés aient le temps de se produire ; il n'a jamais remarqué que le transport vertical de la vapeur ait donné de meilleurs résultats que le transport horizontal ; il croit que les effets observés par M. Nozo tiennent à une autre cause, et que ce dont il faut surtout se préoccuper, c'est de la suppression des remous.

UN AUTRE MEMBRE insiste sur ses observations, et rappelle qu'en Angleterre on ne fait pas usage de l'échappement variable.

On répond qu'en Angleterre, où le charbon se trouve à si bon marché, on n'a pas étudié aussi bien qu'en France la question des échappements, et que, si la consommation par kilomètre y est encore moindre qu'en France, cela tient à ce que le coke y est bien supérieur en qualité.

M. LA SALLE ajoute qu'en Angleterre on produit, dans certaines circonstances, avec 3k. 75 seulement de coke, les effets pour lesquels il est nécessaire d'employer 6 kil. de coke français.

On fait observer que le coke employé au chemin de fer du Nord s'est beaucoup amélioré depuis que l'on applique le lavage aux houilles ; que les ouvriers préfèrent le coke français ; qu'ils ont pu souder 5 bandages avec le coke de la Grappe, tandis qu'ils n'en ont pu souder que 4 avec le coke anglais.

UN MEMBRE dit que cette expérience n'est pas concluante, attendu que le coke de forge doit être le plus léger possible, et que le coke anglais est très dense ; et il est certain que les cokes lavés de Saint-Etienne, qui donnent plus de vapeur que les cokes du Nord, sont cependant encore inférieurs aux cokes anglais.

M. LA SALLE ajoute que, pour que les essais soient concluants, il faut que les forgerons soient habitués aux cokes qu'ils emploient.

UN MEMBRE constate que l'on a fait des essais comparatifs des différents cokes pour l'usage des locomotives, et que les cokes anglais ont été reconnus supérieurs, et seraient toujours préférés si leur prix de revient n'était pas trop élevé.

SÉANCE DU 22 AOUT 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

Il est donné lecture d'une note de M. Bridel sur l'emploi de la tourbe à l'usine d'Undreveillers, dans le canton de Berne, en Suisse, pour la fabrication du fer.

SÉANCE DU 5 SEPTEMBRE 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

M. DEGOUSÉE est invité à donner à la Société quelques renseignements sur le voyage qu'il vient de faire à Constantinople, appelé par le Sultan pour aviser aux moyens d'améliorer le système d'alimentation d'eau de cette ville.

Depuis Constantin, on se procure de l'eau à Constantinople au moyen de barrages construits en marbre blanc qui ferment les gorges des versants, et font des étangs qui retiennent une grande masse d'eau. Les versants, imparfaitement entretenus, ont fini par se couvrir d'herbes et de ronces qui obstruent le passage de l'eau et l'empêchent d'arriver en quantité suffisante aux bassins; cette eau traverse ensuite des conduits souterrains ou des aqueducs, construits, les uns par Constantin et Justinien, les autres par les sultans. La plupart, grâce au défaut d'entretien, sont aujourd'hui, à l'intérieur, dans un si mauvais état, qu'il était sérieusement question de les reconstruire.

M. Degousée a pensé qu'il suffirait d'abord de nettoyer les versants sur une étendue de 100 hectares, en les débarrassant des herbes et des ronces qui les obstruent, et d'y faire 100 kilomètres de rigoles pour faciliter la prompte arrivée de l'eau aux bassins, et éviter les charriages et éboulements, qui ne tarderaient pas à les combler sans cette précaution. Il a proposé de conserver à l'art les aqueducs en posant dans leurs conduits, qui ont $0^{m}.66$ de diamètre, des tubes en fonte de $0^{m}.40$ à $0^{m}.50$ de diamètre, dont la fourniture et la pose ne s'élèveraient pas au dixième de ce que coûteraient les reconstructions.

M. Degousée signale comme très curieux dans les constructions arabes ce qu'ils appellent des *souterrazis*, ou équilibres d'eau, employés par eux pour traverser les larges vallées, des passages d'une montagne à une autre, des contournements difficiles. Dans ces différentes circonstances, où des aqueducs qui devraient avoir quelquefois 4, 5 et 6 kilomètres, seraient très coûteux à établir, ils font descendre l'eau dans des tubes ou dans des tunnels construits en forme d'œuf, avec des briques et du mortier composé de chaux maigre et de briques pilées, et de telle sorte que la couche de mortier est ordinairement plus épaisse que l'assise de briques.

Ces tunnels suivent les ondulations du terrain sur 150 à 200 mètres, pour venir remonter dans une tour, où l'eau se déverse dans une cuvette placée au sommet, et redescend ensuite dans un tube qui suit les ondulations du terrain, pour agir de la même manière dans une autre tour.

Ce système est très peu coûteux, et ne fait perdre à chaque colonne qu'une hauteur d'eau égale au diamètre du tuyau éjaculateur.

Toute la partie comprise entre Pera-Galata et la mer Noire est formée d'un terrain de transition dans lequel toute recherche d'eaux souterraines serait inutile.

De la pointe du Sérail, les terrains tertiaires, au contraire, s'étendent jusqu'à San-Stephano et les Dardanelles, et remontent jusqu'à la porte d'Andrinople et au delà. C'est dans ces localités que M. Degousée a conseillé l'emploi des sondages artésiens, qui produiront certainement des sources d'eaux jaillissantes. Lorsqu'ils seront exécutés sur des points peu élevés et resteront en contrebas du sol sur les points culminants, alors l'eau sera élevée au sol au moyen de pompes.

Dans la partie élevée de Constantinople, les eaux arrivent par une espèce de drainage qui réunit leurs eaux dans un réservoir, d'où des conduites et aqueducs les mènent à la porte d'Andrinople.

L'eau est très chère dans toute la ville; en été, les distributions publiques aux fontaines ne sont que de deux litres par individu dans les quartiers turcs; dans les quartiers francs, de moins d'un demi-litre.

Ce sont des quantités bien minimes pour un peuple qui ne boit pas de vin et se livre à des ablutions si fréquentes (1).

M. Degousée a engagé le gouvernement à faire construire dans les casernes des citernes dans le système vénitien. Ces citernes, qui existent à Venise depuis le XI^e^ siècle, sont de grandes excavations enveloppées d'un glaisage de 1 mètre d'épaisseur et remplies de sable de mer fin qui peut enfermer un tiers de son volume d'eau, qu'il filtre pendant des siècles sans l'altérer ni la corrompre.

La dépense de chaque citerne, pouvant contenir 700,000 litres d'eau, est évaluée par M. Degousée à environ 50,000 fr., à cause des prix énormes des transports, qui se font à dos d'âne. Les projets ont été acceptés.

M. DEGOUSÉE ajoute que la Turquie, si riche en mines, emploie le plus mauvais système pour les exploiter. Là où les concessions devraient être perpétuelles, on n'accorde que des concessions de vingt ans; il en résulte que les concessionnaires effleurent les mines pour en prendre les meilleures parties, et rendent souvent les travaux ultérieurs impossibles.

Tout est à faire dans ce pays, où il n'y a pas même de route de Constantinople à Andrinople, où tous les transports se font à dos d'âne ou à dos de chameau.

Les Turcs ont jusqu'à présent traité avec les Arméniens, qui leur ont fait payer leurs services à des prix fabuleux, et M. Degousée ne doute pas que d'ici à peu de temps les ingénieurs français ne trouvent en Turquie des débouchés très avantageux, le gouvernement ayant une préférence marquée pour nos nationaux.

---

(1) L'eau se vendait cet été 50 c. et même 1 fr. l'hectolitre.

EXPOSITION UNIVERSELLE DE LONDRES.

M. Ch. Callon communique ensuite à la Société les renseignements suivants sur l'exposition universelle de Londres.

MACHINES DE BATEAUX A VAPEUR.

Ainsi que l'a déjà remarqué M. Hubert, la machine la plus importante de l'exposition est celle de MM. James Watt et C^e^, destinée à un bateau à hélice.

Elle se compose de quatre cylindres horizontaux, placés deux à bâbord et deux à tribord, et attelés sur un arbre à double coude placé dans le sens de la longueur du navire. La vitesse de cette machine n'est pas aussi considérable qu'on pourrait le croire au premier aspect, car l'arbre coudé ne fait que 65 révolutions par minute, ce qui, pour une course de 0^m^.91, répond à une vitesse moyenne de 1^m^.90 par seconde.

Si le constructeur a entendu transmettre le mouvement directement à l'hélice, il faut que cette hélice ait des dimensions considérables. (Elle n'est point exposée.)

La machine est à basse pression; sa force totale est de 700 chevaux; les cylindres, de 1^m^,32 de diamètre sur 0^m^,91 seulement de course, proportion motivée par la position des cylindres en travers du bateau, et surtout par l'usage que le constructeur a fait de contre-tiges qui ont absorbé une grande partie de la largeur disponible.

L'emplacement occupé par la machine est de 7 mètres sur la longueur du bateau, et de 10 mètres sur la largeur.

Le centre de gravité du système est très abaissé au dessous de la ligne de flottaison, avantage précieux pour un steamer appelé à tenir la mer. Le constructeur a pris en outre beaucoup de précautions pour que la machine soit parfaitement solide (elle repose sur une plaque de fondation générale) et parfaitement équilibrée par le travers. A cet effet, il a placé les pompes d'alimentation à bâbord, et le mécanisme de la distribution qui les équilibre à tribord; la distribution de chaque cylindre de bâbord est liée à celle du cylindre correspondant de tribord par une bielle fendue qui s'ouvre pour laisser passer l'arbre de couche.

Les pompes à air sont placées entre les deux cylindres de chaque côté, et inclinées. Elles sont commandées par l'arbre moteur, et marchent environ un tiers moins vite que les pistons à vapeur.

Malgré l'adoption de la basse pression et la solidité parfaite donnée à toutes les pièces, le poids, y compris les chaudières remplies d'eau, est de 500 kil. seulement par cheval.

Vient ensuite la machine de Stothert, Slaughter et C^e^, de Bristol. Elle présente l'aspect général de la machine à deux cylindres fixes et inclinés de Brunel, mais *renversée*, c'est-à-dire que les axes des deux cylindres, au lieu de converger vers un arbre coudé placé au milieu et *au dessus* d'eux, convergent vers un arbre placé *en contrebas*.

Le but de cette disposition est d'abaisser le plus possible l'arbre coudé, qui est celui de la vis ou organe propulseur.

L'action, comme on voit, est directe, et le constructeur a donné à son arbre une vitesse de 128 tours par minute (pour une puissance de 100 chevaux).

Mais, au moyen d'une paire d'engrenages retardateurs, il a réduit la vitesse de ses pompes à air à 40 coups doubles par minute (celle qu'elles ont dans les machines à roues de la même puissance).

Il a fait breveter cette disposition, qui rend la vitesse de l'hélice indépendante de celle des pompes à air, et réciproquement. D'où il suit que le constructeur est maître de choisir, d'une part, pour son propulseur, une vitesse aussi grande que l'exige le maximum d'effet utile; d'autre part, pour ses pompes à air, une vitesse aussi réduite qu'il croit devoir le faire pour satisfaire à la condition du minimum d'usure et de réparations.

Malheureusement la disposition adoptée ne paraît pas se prêter aux exigences de l'entretien et des réparations. Les pièces de transmission de mouvement aux pompes à air sont trop ramassées, et, chaque pompe étant placée sous le cylindre à vapeur qui lui correspond, les réparations de ces pompes exigent un démontage long et pénible. La position des cylindres au dessus de leur arbre coudé rend difficile le graissage des boîtes à étoupe.

MM. Penn et C^e^, de Greenwich, ont aussi exposé une machine de bateau à hélice pour la navigation maritime dont la disposition générale mérite d'être mentionnée.

Elle consiste en deux cylindres horizontaux, parallèles et situés du même côté de l'arbre de l'hélice. De l'autre côté de cet arbre sont les deux pompes à air à piston plein et *à double effet*, marchant directement par les pistons moteurs et *avec la même vitesse qu'eux*. Aussi le diamètre des clapets et des conduits de ces pompes à air est-il égal, sinon supérieur, à celui des pistons eux-mêmes.

Il paraît difficile que le poids des pompes à air compense exactement le poids des cylindres à vapeur et de leur bâti, fortement relié avec celui de l'arbre; en d'autres termes, le centre de gravité de la machine ne doit pas être exactement dans le plan vertical de l'axe de l'hélice, comme cela a lieu dans la machine de James Watt et C^e^.

L'autre condition, spéciale en quelque sorte aux machines à hélice, et qui consiste à ramasser le plus possible la machine dans le sens de la largeur du bateau, est remplie, dans la machine horizontale de Penn, par un dispositif de piston à vapeur annulaire faisant corps avec un tube d'au moins 0^m^.25 de diamètre qui traverse les couvercles du cylindre dans deux presse-étoupes; au centre de ce tube, et par conséquent au centre du piston moteur, est articulée la bielle correspondante. — On économise ainsi un emplacement égal à la demi-course des pistons.

Nous allons retrouver plus bas le même dispositif ou des dispositifs analogues dans les machines verticales, où la nécessité d'économiser la place dans le sens de la *hauteur* se fait sentir, comme celle d'économiser la *largeur* dans les machines horizontales à hélice.

Les tubes, ouverts par les deux bouts, de ces pistons annulaires, ont évi-

demment un grand défaut, celui de causer un refroidissement considérable dans l'intérieur des cylindres.

On atténuerait un peu ce refroidissement en fermant chaque tube du côté opposé à la commande par un couvercle amovible au besoin.

La machine exposée est de 60 chevaux. Elle est très ramassée et son centre de gravité très abaissé, car il est plutôt au dessous qu'au dessus de l'axe de l'hélice, lequel n'est en contrehaut de la plate-forme commune aux cylindres à vapeur, à l'arbre et aux pompes à air, que de la quantité strictement exigée par le rayon des manivelles.

MM. Penn et C° ont aussi exposé un appareil de 24 chevaux, à roues, composé de deux machines verticales oscillantes, à basse pression, qui n'ont rien de particulier.

L'une des roues est à palettes fixes et l'autre à palettes mobiles, exactement sur le modèle de M. Cavé; toutes deux sont très légères et très bien exécutées. Au moyen d'un dispositif de bras obliques qui se dirigent et se fixent sur un tourteau unique de forme convenable situé au milieu de la largeur de la roue, l'arbre de cette roue se trouve avoir très peu de porte-à-faux sur le flanc du navire; un seul palier, placé tout près et en arrière du tourteau, et solidement rattaché à la coque, suffit pour porter la roue, et dispense du palier fixé ordinairement à la paroi extérieure du tambour.

Cette disposition est bonne pour de petits bateaux ayant des roues d'une largeur modérée.

M. Atherton, de Devonport, a exposé un appareil de 25 chevaux, pour la mer, consistant en deux machines couplées et composées chacune d'un cylindre vertical, d'un balancier, d'une bielle et d'un arbre à manivelle disposés comme dans la machine fixe de Watt; seulement, pour ramasser le plus possible sa machine en hauteur, le constructeur a supprimé le parallélogramme, et a lié le balancier au centre du piston moteur par une bielle qui passe et oscille dans un tube servant comme de tige creuse au piston.

Comme les constructeurs anglais paraissent donner cette disposition comme originale et nouvelle, il est bon de rappeler qu'elle a été exécutée en France il y a déjà nombre d'années (voir le *Bulletin de la Société d'encouragement*, mars 1836), et rien ne prouve même que cette machine de 1836 soit la première où l'on ait fait usage d'une tige creuse pour supprimer le parallélogramme et abaisser le balancier.

Quoi qu'il en soit, M. Atherton a profité de cet abaissement de son balancier pour en supporter l'arbre ou essieu sur le condenseur, auquel il a donné une forme appropriée à cet objet. Cet emploi du condenseur à deux fins amène une économie de poids dans l'appareil.

MM. Maudslay et Field, de Londres, ont exposé un grand nombre de modèles de machines de bateau parfaitement exécutés. Le but de cette collection paraît être de rappeler les dispositions générales des machines de navigation exécutées à différentes époques par la maison Maudslay, et appropriées, soit aux divers modes de navigation maritime ou fluviale, soit aux divers modes de propulsion (roues à pales ou hélices).

La très grande majorité de ces machines sont à cylindres verticaux.

Voici, en quelques mots, celles qui offrent des dispositions remarquables :

A. — *Maudslay's double cylinder marine engines.*

Un appareil pour roues à pales, composé de deux machines consistant *chacune* en deux cylindres verticaux dont les pistons marchent par le même coude et la même bielle. Pour cela, les tiges des pistons sont liées aux extrémités de la barre horizontale d'un joug en forme de T, dont la branche verticale descend dans l'intervalle des deux cylindres et s'articule à son extrémité inférieure avec la bielle.

Par ce moyen, la hauteur de l'arbre des roues au dessus du fond du navire est, à *sa limite*, c'est-à-dire abstraction faite des épaisseurs et du jeu nécessaire, égale au *double de la course*.

B. — *Maudslay's direct-acting oscillating cylinder steam-engines.*

Appareil pour roues à pales composé de deux machines verticales oscillantes avec arbre supérieur. — Un condenseur unique entre les deux machines.

La hauteur limite de l'arbre des roues est réduite ici à *une fois et demie* la course.

C. — *Maudslay's double piston-rod engines for shallow river navigation.*

L'appareil se compose essentiellement de deux cylindres fixes verticaux et d'un arbre de roues placé au dessus. Pour réduire la hauteur à son minimum, chaque piston moteur a deux tiges dont les projections horizontales sont situées sur une ligne coupant à 45° environ l'axe moteur. Ces deux tiges *jumelles* se prolongent au dessus du pont, et là, au moyen d'un joug biais de forme convenable, commandent une bielle dont l'extrémité inférieure s'articule au coude de l'arbre. Le centre du couvercle ainsi débarrassé du *stuphing-box*, on peut faire passer le coude très près de ce couvercle, et par conséquent on se rapproche le plus possible de la *limite* inférieure, une fois et demie la longueur de la course, condition importante à réaliser pour un bateau de rivière assujetti à tirer peu d'eau; tandis qu'au contraire la présence au dessus du pont d'un bâti d'une hauteur égale à la longueur de la bielle n'a pour un tel bateau aucun inconvénient.

D. — *Maudslay's annular cylinder marine engines.*

Disposition ayant le même but que celle A.

Deux machines couplées pour roues à pales. Chacune d'elles consiste en un cylindre vertical annulaire, avec piston également annulaire et muni de deux tiges reliées par un joug en T, dont la partie verticale descend dans le vide du cylindre pour servir de point d'attache, aussi bas que possible, à la bielle.

Il est évident qu'on peut toujours s'arranger de manière que le *cylindre*

annulaire offre moins de surface au refroidissement extérieur que deux cylindres séparés de même capacité.

E. — *Maudslay's horizontal direct : — acting marine engines for screw-propulsion.*

Appareil composé de deux machines horizontales, à course très courte, posées par le travers du bateau et conjugées sur l'arbre d'une hélice, toutes deux à bâbord.

Le côté de tribord se trouve notablement moins chargé ; aussi le constructeur accumule-t-il de préférence de ce côté l'approvisionnement de charbon.

On comprend qu'il est impossible d'étudier l'importante collection des machines à bateaux qui se trouvent à l'exposition de Londres sans que l'attention se porte tout naturellement sur l'innombrable flotte de steamers dont la Tamise est couverte. Il est à remarquer que les bateaux à vapeur les plus nouveaux, qui sont aussi les meilleurs marcheurs, sont en même temps ceux qui ont les plus petites roues. Il est question ici des roues ordinaires ou à pales.

Ce fait, qui au premier abord paraît paradoxal, puisqu'une roue d'un grand diamètre est dans de meilleures conditions qu'une petite roue relativement à l'immersion et à l'émersion de ses palettes, ce fait s'explique parfaitement quand on réfléchit qu'une roue d'un petit diamètre fait plus de tours dans un temps donné : d'où il suit qu'étant donnée une machine d'un volume et d'un poids déterminés, on pourra dépenser d'autant plus de vapeur, c'est-à-dire développer d'autant plus de puissance avec cette machine que les roues seront plus petites. De là possibilité d'une augmentation dans la vitesse du sillage, sans augmenter le poids de la machine, mais seulement celui du générateur.

Si les Américains obtiennent de grandes vitesses de marche avec des roues d'un grand diamètre, c'est que leurs cylindres ont des courses considérables, que ne comporte pas en général l'installation des steamers européens.

M. Ch. Callon rappelle que, dans les *Etudes sur la navigation à vapeur* publiées par lui et M. Ferdinand Mathias en 1845 ils ont donné la formule qui lie le diamètre des roues à *la vitesse* du piston moteur, et que le rayon moyen de la roue à palettes est proportionnel à la puissance 2/3 de la vitesse moyenne du piston, et que cette relation subsiste, soit que l'on prenne pour point de départ la théorie de Parent et de Dubuat, soit que l'on prenne celle de Borda.

UN MEMBRE donne ensuite quelques renseignements sur les expériences que M. Fournier fait en ce moment sur des voûtes en tôle. Ces expériences n'étant pas encore terminées, il en sera rendu compte dans la prochaine séance.

SÉANCE DU 19 SEPTEMBRE 1851.

Présidence de M. C. POLONCEAU, *vice-président*

M. C. POLONCEAU donne lecture d'une note dans laquelle il rend compte d'un appareil imaginé par M. Vallée, chef des travaux des ateliers du chemin de fer d'Orléans, et M. Lemonnier, contre-maître de l'ajustage.

Cet appareil, applicable aux machines fixes et aux machines locomotives, permet la levée immédiate des soupapes de sûreté, sans augmentation de pression dans la chaudière, aussitôt que la tension de la vapeur dépasse le chiffre fixé.

C'est un mécanisme très simple, qui a l'avantage de pouvoir s'adapter à toutes les balances à ressort existantes. Il consiste en un déclic à un point fixé d'un levier, joignant deux parties séparées de la tige de la balance. La jonction se fait au moyen de boulons formant articulation avec une barre de fer qui forme maillon et se prolonge du côté supérieur, au delà des deux points d'articulation. En abaissant ce levier, on réduit de deux fois la longueur du maillon la longueur de la tige de la balance, et, en le lâchant, cette tige revient à sa longueur primitive.

Pour faire fonctionner l'appareil, on maintient le levier abaissé en le faisant glisser entre deux tasseaux fixés sur le corps de la balance, de sorte que la soupape peut fonctionner comme à l'ordinaire tant que le levier glisse entre ses guides; et, lorsque la tension des ressorts fait dépasser au levier la position de ces mêmes guides, il s'échappe, et, la tige s'allongeant de deux fois la longueur du maillon, la soupape n'est plus chargée que par une tension beaucoup plus faible que celle qui avait lieu avant le déclic du levier.

Le mécanicien peut remettre l'appareil dans sa position normale dès que la vapeur sortie a ramené la pression dans la chaudière au chiffre réglementaire.

On voit, d'après cette indication sommaire de l'appareil, que l'on peut régler facilement et à volonté, par la position des tasseaux, la pression que le mécanicien ne peut jamais dépasser, et que, par la longueur du maillon qui unit les deux parties de la tige de la balance, on fixe la quantité dont la soupape peut se lever pour laisser échapper la vapeur, lorsque la tension dans la chaudière dépasse le maximum fixé.

Ce mécanisme, essayé sur les locomotives, a fonctionné d'une manière très satisfaisante; il donne de complètes garanties de sécurité, et peut, de plus, indiquer très facilement toutes les infractions des mécaniciens aux règlements qui leur défendent de dépasser la pression pour laquelle leurs chaudières sont timbrées.

M. POLONCEAU ajoute qu'il a essayé depuis deux mois environ un système simple, léger et peu coûteux, composé de deux lames d'acier disposées comme des ressorts de voitures, et qui donne aussi, jusqu'à présent, de très bons résultats.

DÉSINCRUSTATION DES CHAUDIÈRES DES MACHINES A VAPEUR.

M. POLONCEAU expose que, pour désincruster les chaudières des locomotives, il a successivement essayé différents produits chimiques ayant pour base des sels de soude, du sel marin, du tannnin, des décoctions de bois, et qu'il a obtenu des résultats plus ou moins satisfaisants, mais toujours incomplets, ces matières n'ayant pas, en général, d'action sur les incrustations anciennes, qui n'ont pu être atteintes jusqu'à présent que par des substances occasionnant le crachement des machines, et même attaquant les métaux. Ce crachement est un grand inconvénient, surtout dans les machines locomotives: la vapeur entraîne alors de l'eau, des matières terreuses, la dissolution saline elle-même. On est obligé de la concentrer davantage, ce qui a probablement pour effet d'augmenter la température de production de la vapeur; de plus, les matières terreuses, dans leur passage, raient les cylindres et pénètrent dans tous les joints.

Des madriers de chêne placés dans les chaudières des machines fixes ont donné d'assez bons résultats. On les retire carbonisés après un certain temps, et le seul résidu est de la boue. Sur les locomotives, l'expérience est plus difficile, parce qu'il faut éviter que le bois désagrégé ne tombe entre les parois ou les tubes de la chaudière. Des essais sont commencés sur le chemin de fer d'Orléans; mais ils ne sont pas encore assez complets pour que l'on puisse en tirer des conclusions.

L'emploi des mélasses de raffinerie a été aussi, dans quelques cas, assez satisfaisant. Ces matières n'attaquent pas les métaux, empêchent assez bien les incrustations, produisent moins de crachement que les autres substances; mais, quoique amollissant les anciens dépôts, elles n'agissent cependant qu'avec beaucoup de lenteur. Elles n'ont pas non plus été suffisamment expérimentées, et les résultats obtenus sont encore assez incertains.

M. DE FONTENAY a eu l'idée de chercher si les incrustations ne seraient pas quelquefois gélives, car on pourrait alors laisser geler les chaudières dont les parois seraient humides, et les ramener ensuite à la chaleur pour opérer la chute des incrustations. On a trouvé que, pour certaines eaux, les incrustations nouvelles étaient gélives, mais que les anciennes ne l'étaient pas.

M. POLONCEAU considère toutes les tentatives de réduire les dépôts dans les chaudières des locomotives comme très incomplètes; elles ont des inconvénients graves, en supposant même une réussite parfaite du procédé.

Il pense que ce qu'il y aurait de plus convenable serait de purifier les eaux avant leur introduction dans les chaudières. Les appareils, qui devraient être de grandes dimensions, pour laisser à l'eau épurée le temps voulu pour le repos, seraient sans doute trop coûteux pour être appliqués à une machine fixe; mais ce moyen serait très praticable pour les chemins de fer,

qui ont tous les jours une grande quantité de locomotives à alimenter.

M. POLONCEAU a fait des essais dans ce sens, d'après le procédé de M. Knab, qui s'est surtout préoccupé de débarrasser les eaux des carbonates qui formaient la base principale des dépôts. Il a réussi par l'emploi d'un lait de chaux en proportion variable suivant la qualité des carbonates contenus dans les eaux ; c'est indiquer la nécessité d'avoir recours à l'analyse.

Il a aussi précipité le carbonate de chaux, qui s'est déposé lentement, et l'eau reposée, puis évaporée à siccité, a donné une réduction de 2/3 dans le poids des dépôts qu'elle formait avant.

L'inconvénient est le temps nécessaire pour le repos ; il doit être d'une journée au moins, car, si l'eau employée contient encore du carbonate de chaux, il se dépose dans les conduits et les bouche.

Sur quelques chemins de fer, on a eu le grand tort de mettre le lait de chaux directement dans le tender ; il en est résulté qu'on introduisait dans la chaudière plus de carbonate que l'eau n'en contenait naturellement.

Pour éviter le temps de repos nécessaire au dépôt du carbonate, on a essayé le filtrage à travers des tissus ; mais leurs vides s'engorgent, ils ont bientôt cessé de fonctionner. On a essayé aussi la décantation en prenant l'eau à la surface du réservoir ; mais le dépôt n'était pas assez complet.

M. POLONCEAU compte employer trois réservoirs, dans lesquels on précipiterait le carbonate de chaux, puis prendre alternativement à chacun d'eux l'eau à la surface pour l'introduire dans les réservoirs ordinaires ; il espère obtenir ainsi une eau assez reposée, et éviter les obstructions et le crachement. Il ajoute que l'on peut activer la précipitation du dépôt par l'emploi d'un excès de chaux.

Pour se débarrasser des sulfates, on a essayé l'emploi des sels de baryte, qui n'ont que l'inconvénient de coûter trop cher. Il y aurait lieu d'examiner si les sulfates seuls, qui sont généralement en petite quantité, présentent assez d'inconvénients pour exiger cette dépense ; ou s'il serait préférable d'introduire dans la chaudière des substances analogues à celles qu'on emploie dans les machines fixes, mais alors en faible quantité.

Il indique les difficultés qu'on éprouve à nettoyer une chaudière de locomotive lorsqu'elle est incrustée ; il faut la détuber complétement, et il est presque impossible, même avec cette opération très coûteuse, de bien nettoyer à la main. Il a essayé l'emploi des acides, et il constate que les acides végétaux n'ont pas assez d'action, et que les acides minéraux attaquent les métaux.

Il insiste sur la nécessité de trouver des moyens efficaces d'éviter les incrustations qui recouvrent, quelquefois sur plusieurs centimètres, les ciels de foyer, et obstruent les chaudières de telle sorte qu'en retirant les tubes, leur place reste marquée comme dans une véritable maçonnerie : ce sont des causes permanentes de craintes et de dépenses considérables.

M. BERTHOLOMEY a remarqué que dans les raffineries, lorsque, par une cause accidentelle, il y avait introduction de sucre par les retours d'eau, on se trouvait, au bout de quelques jours de marche, dans l'obligation de changer l'eau des générateurs par suite du crachement et de la destruction des robinets : d'où il semblerait résulter que la mélasse pourrait bien n'agir qu'en raison de la grande quantité de potasse qu'elle contenait.

M. POLONCEAU répond que, pour éviter les incrustations, on en met dans les chaudières une si faible quantité qu'il n'est pas probable qu'elle agisse chimiquement, mais plutôt mécaniquement; c'est seulement la viscosité qui empêche la formation des incrustations, et, s'il y a eu tuméfaction dans le cas indiqué, c'est probablement parce qu'il en était entré une très grande quantité dans les chaudières.

M. BERTHOLOMEY ajoute qu'il a remarqué que des incrustations détachées par le carbonate de soude avaient formé des agglomérations de 4 à 5 décimètres cubes sur la plaque du foyer.

On essaie en ce moment chez M. Bayvet le procédé de M. Dám, de Bruxelles, qui consiste dans l'emploi d'un liquide bleu, alcalin, qui n'altère pas les robinets et ne produit pas de crachement. On en emploie un kil. par mois et par cheval. Les inventeurs le vendent 80 cent. le kilogramme, en demandant en outre une indemnité de 1 fr. par cheval et par an. Les anciennes incrustations sont détachées, par ce liquide, en feuilles d'environ 20 cent. de longueur; elles sont percées de trous faits comme des piqûres d'aiguilles.

MM. Bayvet s'alimentent des eaux du canal et de celles d'un puits artésien qui contiennent des sulfates et des carbonates de chaux ayant donné des incrustations de 2 à 3 centimètres.

Ils doivent continuer les essais sur un générateur neuf. M. Bertholomey tiendra la société au courant de ces expériences, et lui fera savoir quels jours seront vidées les chaudières, afin qu'elles puissent être examinées par les membres qui témoigneraient le désir de les voir.

Dans le même établissement on a employé, mais sans succès, les madriers en chêne placés dans la chaudière.

M. DE FONTENAY cite un procédé dont il a lu l'indication dans un journal industriel de M. Baleington, et qui consiste à souder dans les chaudières plusieurs feuilles de zinc dans une position verticale, de manière que les deux surfaces soient en contact avec l'eau. La surface de zinc doit être à la surface mouillée de la chaudière dans le rapport de 1 à 15, en ne comptant qu'une seule face du zinc; il se formerait alors un courant voltaïque, le zinc viendrait à se dissoudre, et les incrustations ne se formeraient pas. Ce procédé, si l'expérience venait à en constater l'efficacité, serait, dans tous les cas, d'une application difficile aux chaudières des machines locomotives, et ne pourrait probablement être employé que dans les machines fixes.

M. POLONCEAU rapporte que l'eau pure, qui est évidemment la meilleure à employer pour éviter les incrustations nouvelles, a servi quelquefois aussi à détacher les anciennes. Il cite l'exemple du chemin de fer d'Alsace, dont les eaux d'alimentation sont incrustantes sur toute une section et pures sur l'autre, de sorte que les machines mises complétement hors de service sur la première section pouvaient encore faire, et pendant long-temps, un bon service sur la seconde. La désincrustation par les eaux pures était si complète, que souvent les machines fuyaient, parce que les joints qui étaient bouchés par les dépôts n'étaient plus étanches une fois ces dépôts enlevés.

Il rappelle, à ce sujet, qu'il n'y avait rien d'étonnant à voir ces matières boucher ainsi les joints, puisque l'on sait très bien que le son, le crotin de cheval, la farine, ont été souvent employés avec avantage pour boucher les fuites de machines qu'il était impossible de réparer sur-le-champ.

M. POLONCEAU fait d'ailleurs remarquer que les eaux n'ont pas besoin d'être absolument pures pour n'être pas incrustantes. Ainsi les eaux de la Seine, quoique souvent très impures et très limoneuses, n'incrustent pas : on en a la preuve sur le chemin de fer de Paris à Versailles (rive gauche), alimenté, tant à Paris qu'à Versailles, par les eaux de la Seine, et dont les chaudières ne contiennent jamais d'incrustation.

Enfin il ajoute que, sur le chemin de Montereau à Troyes, M. Herman ayant eu, dans un cas fortuit, l'occasion d'alimenter les chaudières avec les eaux provenant d'un étang tourbeux, ces chaudières se sont trouvées désincrustées. Il faudrait peut-être faire des essais dans ce sens.

M. LANGLOIS pense que l'effet produit par l'eau des tourbières doit être attribué à la potasse qu'elles contenaient.

M. LA SALLE rapporte qu'il a employé avec succès le bois de chêne, et qu'il a ainsi empêché les nouveaux dépôts et détaché les anciens ; il ajoute que M. Cavé a essayé de faire passer l'eau sur des fagots et de la distiller, mais que ce procédé est coûteux.

M. POLONCEAU croit que les métaux décapés s'incrustent moins que ceux qui ne le sont pas.

M. BELLIER rappelle un fait d'expérience cité par M. Arson, c'est que les chaudières habituellement vidées en pression s'incrustent plus vite que les autres. On explique ce fait en remarquant que la pression doit, en effet, appliquer plus fortement le dépôt sur la surface des chaudières.

M. LA SALLE voudrait que l'on fît des bouilleurs coniques, et qu'ils fussent, à la partie la plus basse, munis d'un robinet de vidange.

M. POLONCEAU rappelle que les machines Scharp et Robert, construites en 1839 et 1840, avaient cette disposition, qui fonctionnait très bien. Elle n'a pas été reproduite depuis, et il serait bon qu'elle le fût. Ces bouilleurs coniques formeraient une espèce d'entonnoir à l'abri de l'ébullition, ce qui faciliterait beaucoup le dépôt, et l'on se servirait de la tension de la vapeur pour vider les dépôts le plus souvent possible, et même en marche, afin d'éviter le crachement.

SÉANCE DU 3 OCTOBRE 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

DRAINAGE EMPLOYÉ POUR ASSAINIR LES VOIES DES CHEMINS DE FER.

M. CALLON lit une note qui lui a été communiquée par M. Price, ingénieur du chemin de fer d'Anvers à Gand.

Dans cette note, il est dit que le point le plus élevé atteint par le chemin

de fer entre Gand et la tête de Flandre est situé entre Saint-Nicolas et les Millepommes. A peu près exactement en ce point, le profil en long est établi en déblai de $1^{m}.20$ en moyenne, et offre une pente de $0^{m}.0035$ par mètre vers Gand. La couche supérieure du terrain est sablonneuse et sèche en été; mais une couche imperméable existant à environ $0^{m}.70$ sous les rails, retient les eaux, et, dans les temps de pluie prolongée, tout le terrain supérieur s'imbibe d'eau et se transforme en boue.

Dans ces conditions, les talus s'affaissaient, et les contre-fossés disparaissaient entièrement pendant la mauvaise saison.

Pour remédier à cet inconvénient, on a placé un développement de 433 mètres de tuyaux de drainage de $0^{m}.04$ de diamètre intérieur, et 467 mètres de $0^{m}.06$. La plus grande partie a été posée dans une rigole creusée au fond d'un des contre-fossés, puis recouverte en terre; quelques tuyaux joignant les premiers ont été placés transversalement à la voie. Tout l'ensemble avait une pente d'environ $0^{m}.005$ par mètre vers un point où l'écoulement des eaux était facile.

Etablis au mois de septembre, après une assez grande sécheresse, les tuyaux ont immédiatement produit un écoulement d'eau continuel. Depuis cette époque, les talus et les contre-fossés se sont maintenus dans un état meilleur que celui des années précédentes. Cependant on a reconnu que les tuyaux de petit diamètre, posés avant que l'on connût les précautions à adopter dans les terrains de sable boulant comme ceux dont il s'agit, se sont en partie obstrués. Il suffira de les relever l'été prochain, et de les placer dans un lit de paille, ou de garnir de chaux ou d'argile les joints des manchons d'assemblage.

Les 890 mètres courants de tuyaux ont coûté, pour l'achat et le transport, 128 fr. 60 c., soit $0^{f}.1450$ par mètre: la pose a été faite sans dépense spéciale par les ouvriers chargés de l'entretien du chemin. En résumé, l'essai a bien réussi. Les tuyaux de drainage constituent un moyen nouveau fort économique, et, en certaines circonstances, extrêmement utile, de maintenir le corps de la voie dans des terrains difficiles.

On aurait pu avoir recours aux fascinages, ou bien aux perrés et aux revêtements en pierres ou en briques; mais ces divers moyens sont assez coûteux.

CONSTRUCTION DES WAGONS A MARCHANDISES.

M. POLONCEAU lit ensuite une notice de M. Debonnefoy sur l'emploi des moises dans la construction des wagons.

L'auteur du mémoire cherche à faire ressortir d'abord les inconvénients que présente le système de construction qui a été appliqué généralement jusqu'à ce jour, et qui a pour base le mode d'assemblages par tenons et mortaises, et la consolidation de la charpente par des ferrures. Les tenons et mortaises affament le bois, et déterminent la prompte pourriture des pièces par l'introduction des eaux de pluie, qui y séjournent plus long-temps qu'à l'extérieur. Les équerres sont toujours des pièces lourdes et coûteuses qui favorisent aussi l'action de l'eau, qui s'infiltre entre elles et le bois : le bois, en séchant, laisse du jeu, et dès lors le ferrement n'a plus d'action.

tiqué au chemin d'Avignon ; il est depuis long-temps en usage dans les constructions de l'artillerie et de la marine, et tous les constructeurs de charronnage et de carrosserie le mettent journellement en pratique.

M. DEBONNEFOY fait remarquer que les wagons à marchandises périssent parce que les planchers se séparent. Au moyen de moises on consolide les caisses, tandis que, les assemblages étant faits à tenons et mortaises, ils jouent très promptement et ne présentent bientôt plus de solidité. Quant aux harpons, ils ne consolident que les parties auxquelles ils sont appliqués ; les moises tiennent tout l'ensemble d'un panneau.

M. POLONCEAU fait observer que la caisse tend à être ballottée par les marchandises, et que plus le chargement est élevé, plus grande est la force vive avec laquelle elles agissent sur les parois au moment d'un choc, d'un arrêt brusque dans la marche ou d'une mise en marche un peu rapide. Il pense que les moises ont un grand avantage, dans ce cas, pour fortifier les parois et former de bons assemblages. Les tenons, dit-il, sont des nids à pourriture. D'ailleurs, pour les former, on coupe la pièce de bois de manière à l'affaiblir ; les moises, au contraire, résistent par toute la somme de leurs fibres. Enfin, avec les tenons, il faut employer des harpons retenus par des vis ou des boulons qui pénètrent dans les montants, les affaiblissent et les préparent à une destruction plus prompte.

M. LA SALLE répond que les moises ont aussi besoin d'être entaillées pour les maintenir en place, et qu'en outre il faut les serrer par des boulons ; la section des bois est par conséquent aussi bien réduite dans ce cas que dans les assemblages à tenons et mortaises. Si les entailles sont faibles, les pièces tirent sur les boulons qui sont placés en travers, et tendent à fendre le bois, inconvénient que ne présentent pas les harpons. Au surplus, M. La Salle ne critique l'emploi des moises que dans l'application telle qu'elle a été faite aux caisses des wagons à bestiaux d'Orléans. Les assemblages périssent rarement dans le haut des caisses ; c'est surtout dans le bas qu'il serait intéressant d'améliorer la construction. Or les nouveaux wagons d'Orléans ont encore leurs montants assemblés à tenons et mortaises à leur base ; il était moins important de chercher à modifier la partie supérieure, qui doit rester au contraire la plus simple et la plus légère possible, afin que dans les chocs la masse du sommet n'ébranle ou ne disloque pas la base.

Le président, pensant que la discussion sur ce sujet est prématurée, propose le renvoi du mémoire de M. Debonnefoy à la section des chemins de fer, et revient à l'ordre du jour, qui appelle la suite de la discussion sur l'incrustation des chaudières des machines à vapeur.

INCRUSTATION DANS LES CHAUDIÈRES DES MACHINES A VAPEUR.

Un membre, M. CHAPLIN, cite les résultats suivants obtenus par le procédé de M. Dam.

Ce procédé a été appliqué en Belgique sur deux lignes de chemins de fer.

Sur le chemin de Namur à Liége, des expériences ont été faites sur des

machines déjà incrustées. Pour les désincruster, on a fait marcher la machine locomotive à petite vitesse pendant une demi-journée, en mettant 6 à 7 kil. de réactif dans le tender (les machines avaient 30 à 40 chevaux de force). La machine a beaucoup craché; puis, quand elle est rentrée, on a rempli la chaudière d'eau, et l'on a laissé un petit feu le reste de la journée. Le lendemain, en la vidant, on a trouvé beaucoup d'incrustations qui se sont détachées d'elles-mêmes, les autres se détachant avec la plus grande facilité. Elles disparaissaient toutes d'ailleurs complétement par l'emploi constant de l'eau saturée de réactif.

La chaudière une fois nettoyée, on peut l'alimenter avec l'eau des réservoirs, qui a été préalablement saturée par une quantité de réactif qui varie suivant la nature des eaux. La saturation se fait dans les réservoirs, et le précipité qui se forme doit se déposer le plus long-temps possible. Dans le cas où la capacité des réservoirs ne permet pas de laisser déposer long-temps, il n'y aurait que peu d'inconvénients à introduire le liquide trouble dans la chaudière; seulement, une certaine quantité du précipité tendant toujours à s'agglomérer dans le fond du réservoir, ne fût-ce qu'au bout d'une demi-heure, il convient de prendre l'eau le plus près possible de la surface au moyen d'une tubulure à hauteur convenable.

Dans ces expériences, les eaux étaient très dures. Les essais se faisaient sur cinq locomotives, dont trois fonctionnaient chaque jour. La distance à parcourir était de 63 kilomètres, et le trajet se faisait neuf fois par jour. Le parcours total était fourni en 51 heures, dont 17 heures de marche et 34 heures de repos avec feu allumé. La consommation d'eau était d'environ 653 litres par machine et par heure, y compris les eaux perdues et soufflées par les machines. La consommation en réactif pendant 30 jours a été de 726 kilog., y compris la quantité qui a servi à la désincrustation préalable des cinq machines.

Sur la ligne de Bruxelles à Quiévrain et de Bruxelles à Namur, l'essai a été fait d'abord sur une locomotive fort incrustée. La première fois qu'elle a été vidangée, on a rempli un panier à coke d'incrustations et de quelques boues; la seconde fois, deux paniers à coke ont été remplis par les incrustations et beaucoup de boues; la troisième fois, on a retiré seulement un 1/2 litre d'incrustations et quelques boues blanches provenant des calcaires qui avaient été entraînés du réservoir. Les tubes étaient lisses et nets, et les quelques incrustations qui restaient encore sur les tirants et sur quelques parties du fer pouvaient être enlevées à la main. De plus, le réactif n'a paru exercer aucune action nuisible sur les métaux.

Cette expérience a été faite sur deux machines, et la consommation moyenne du réactif, tant pour opérer la désincrustation des deux machines que pour prévenir de nouvelles incrustations, a été de 2^{k}.5 par jour et par machine.

UN MEMBRE demande à connaître la composition de ce réactif.

On lui répond qu'il ne peut en être donné connaissance qu'à la commission nommée pour examiner ces questions.

UN AUTRE MEMBRE donne les résultats qu'il a obtenus en 1846 contre l'incrustation des chaudières des machines fixes à l'usine de Saint-Léonard (Vieille-Montagne), à Liége.

Il a employé un mélange composé de :

Fécule.	3 kil.
Gomme arabique. . .	1
Sucre candi.	1
Sel de soude. . . .	1
Total.	6 kil. pour une chaudière d'une capacité de 10 mètres environ.

Cette composition, bien broyée, est introduite dans la chaudière, et se renouvelle tous les deux mois ; elle produit un précipité gris sale, qui s'échappe à chaque vidange. On n'a jamais remarqué de traces d'incrustation. Bien que la soude soit sans doute l'agent principal du précipité, il faut toutefois faire observer que la suppression de la gomme arabique, qui a été essayée deux fois, a déterminé sur les parois de la chaudière une croûte très légère, qui a disparu aussitôt qu'on y est revenu.

Les eaux qui alimentent les machines des bords de la Meuse proviennent de puits percés dans le gravier, et qui généralement sont assez pures.

Depuis, l'usage en a été continué, ainsi que dans diverses autres usines auxquelles on l'avait indiqué, et l'on s'en trouve bien.

M. POLONCEAU fait remarquer qu'il est nécessaire d'indiquer la nature des eaux sur lesquelles on opère, pour qu'on puisse se rendre compte des résultats obtenus.

UN MEMBRE fait remarquer qu'on n'a pas tiré tout le parti qu'on devait attendre de l'emploi de la chaux comme réactif. Il pense que cette matière, bien utilisée et mélangée convenablement dans les réservoirs *ad hoc*, doit donner des résultats très satisfaisants dans la plupart des cas pour les eaux employées dans les machines locomotives. Il faudrait aussi, avant d'introduire le lait de chaux, chauffer l'eau dans les réservoirs, et le précipité se ferait bien plus rapidement : car il ne faut pas oublier que le temps de repos nécessaire pour précipiter le dépôt est la plus grande objection qui ait été faite contre l'emploi de la chaux, parce qu'il nécessite la construction de réservoirs plus nombreux que ne l'exige le service ordinaire.

M. POLONCEAU fait remarquer que, pour les machines locomotives, il faut absolument purifier les eaux avant de les introduire dans la chaudière, et par conséquent dans le réservoir, tandis qu'il n'en est pas de même pour les machines fixes, dans lesquelles on peut très bien opérer la purification des eaux. Il est même plus avantageux d'opérer ainsi qu'avant l'introduction de l'eau dans les chaudières.

Il s'ensuit que, pour résoudre la question, il faut suivre deux marches bien distinctes, selon que l'on voudra purifier les eaux pour des machines locomotives ou pour des machines fixes.

SÉANCE DU 17 OCTOBRE 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

Exposition universelle de Londres.

M. CH. CALLON donne de nouveaux détails sur l'exposition de Londres; il dit que la plupart des machines exposées dans le quartier anglais révèlent une tendance marquée à imiter les modèles français des petites machines à vapeur fixes, à haute pression, sans condensation, légères et peu coûteuses, aujourd'hui si répandues, principalement dans les ateliers de l'industrie parisienne, et dont notre exposition de 1849 renfermait un si grand nombre de spécimens.

Il en conclut que l'on tend à abandonner, aussi bien pour les machines fixes que pour les machines de bateaux, les anciens modèles anglais.

M. CH. CALLON signale, en passant, le système d'embrayage et de débrayage à cliquet pour la jonction de deux moteurs inventé par M. Pouyer-Quertier (de Rouen), et dont l'exposition offre deux modèles. Ce mécanisme ingénieux, mais nécessairement compliqué, se trouve décrit dans le n° 108 du Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse. Etabli aujourd'hui dans plusieurs usines de Normandie et d'Alsace, il pare aux inconvénients trop connus des divers modes d'embrayage par manchons d'accouplement, et repose sur le principe suivant :

« Etablir la liaison entre les deux moteurs par une roue à rochets fixée à » demeure sur l'arbre du moteur principal, en faisant agir sur les dents de » ce rochet les cliquets d'un disque tournant librement sur cet arbre, mais » lié invariablement au moteur supplémentaire; faire soulever ces cliquets » par le fait même du ralentissement du moteur supplémentaire par rapport » au moteur principal; le faire réengrener sans choc aussitôt que la vitesse » du moteur auxiliaire, déchargé pendant quelques instants, se rétablit égale » ou supérieure à celle du moteur principal. »

Moteurs hydrauliques.

A l'exception de deux modèles à l'échelle de 1/12e de grandes roues à augets destinées à l'épuisement des mines de la grande Compagnie du Devonshire, et exposées par M. Nathaniel Smith, ingénieur de cette Compagnie, rien de ce genre n'attire l'attention.

Ces deux roues, de $12^{m}.20$ de diamètre sur $3^{m}.66$ de largeur, sont an-

noncées être d'une force de 140 chevaux chacune. Par l'intermédiaire de tirants en fer rond de 0m.082, soutenus de distance en distance sur des poulies à gorges, et dirigés suivant une rampe de 700 mètres de longueur sur 117 de hauteur, l'une de ces puissantes roues agit sur un système de pompes qui élèvent l'eau de 210 mètres de profondeur, avec une vitesse de quatre coups et demi par minute.

L'autre roue élève l'eau de 146 mètres de profondeur par l'intermédiaire d'une ligne de tirant de 950 mètres de longueur.

Il faudrait connaître la disposition des localités, c'est-à-dire la situation des biefs qui alimentent ces roues et celles des puits qu'elles desservent, pour se prononcer sur la question de savoir si ce système, parfaitement bien établi sans doute, mais compliqué, sujet à un grand entretien, et dont les frottements absorbent une puissance considérable, était bien celui qu'il fallait choisir de préférence à tout autre.

Toutefois, la pensée se reporte presque involontairement sur la ressemblance frappante qu'il présente avec les anciennes machines d'épuisement, si souvent décrites, des mines d'Hinlgeat, en Bretagne, que la machine à colonne d'eau de M. Juncker a supplantées avec une si grande économie et de force motrice et d'entretien annuel ; et l'on ne peut s'empêcher de douter que l'appareil exposé par la Compagnie du Devonshire soit réellement ce qu'il y a de mieux à faire dans l'espèce.

Turbines.

Les galeries anglaises renferment aussi une petite turbine (de M. Erskane), à un seul orifice injecteur ou adducteur, qui ressemble assez à celle que M. Canson, d'Annonay, avait exposée en 1849 ; mais l'une et l'autre ne peuvent pas être noyées et ne sont propres qu'à l'utilisation de petits cours d'eau sous de hautes chutes. L'attention ne saurait donc s'arrêter utilement sur cette machine.

En fait de turbines hydrauliques, il n'y en avait qu'une seule de vraiment remarquable : c'est celle qu'avaient exposée MM. Fromont et fils, successeurs de M. Fontaine (de Chartres), dont les machines avaient déjà figuré aux deux expositions de 1844 et 1849. Cette turbine, d'une belle exécution, qui a valu à MM. Fromont une médaille de première classe, est dite *turbine double*. Cette dénomination exige, pour être comprise, quelques explications.

Si l'on consulte les expériences faites jusque dans ces derniers temps, on remarque que toutes les turbines éprouvent, quoiqu'à un degré différent, un inconvénient capital, savoir, l'amoindrissement du rendement au fur et à mesure que la machine dépense un volume d'eau de plus en plus faible, en sorte que ce rendement se trouve de plus en plus appauvri dans la saison des sécheresses, c'est-à-dire précisément dans la saison où il importerait qu'il se maintînt au plus haut taux possible.

Ainsi, pour ne citer qu'un seul exemple, il résulte des expériences faites dans le temps par M. Morin que le rendement de la turbine de Mullbach, qui s'élevait à 79 0/0 lorsque la vanne circulaire était ouverte de 0m.27, se

réduisait à 37,0/0 quand la levée de vanne n'était plus que de $0^m.05$, soit les $0^m.185$ de l'ouverture primitive.

M. Fourneyron a essayé de parer à cet inconvénient en divisant la hauteur de sa turbine en deux ou plusieurs compartiments. M. Kœcklin, dans la vue de parvenir au même but, a établi quelquefois sur la même chute deux ou trois turbines de grandeurs différentes, attelées en quelque sorte sur le même arbre de transmission, mais disposées de manière à pouvoir marcher ensemble ou séparément, suivant le plus ou moins d'abondance des eaux.

M. Fontaine, enfin, a imaginé sa *turbine double*, composée de deux turbines concentriques venues de fonte d'un seul jet, et pouvant, au moyen d'un vannage convenablement disposé, recevoir l'eau, soit ensemble, soit séparément.

Mais, il faut bien le dire, ces divers dispositifs ou artifices, même celui couronné par le jury international, ne sont que des palliatifs fort incomplets, surtout quand les turbines sont noyées. C'est ce que M. Callon espère prouver prochainement à la Société par le compte-rendu des expériences qu'il vient de faire sur une nouvelle turbine imaginée par M. Girard, membre de la Société, et qui ont prouvé la possibilité, niée jusqu'à ce jour, d'obtenir d'une turbine, même noyée, un rendement constant de 70 à 75 0/0 pour des volumes d'eau variables dans le rapport de 1 à 7.

Pompes rotatives.

Une inspection, probablement trop rapide, ne nous a rien révélé de remarquable à l'égard des pompes à piston ordinaires; mais notre attention a été attirée par plusieurs pompes rotatives établies sur le principe de l'application de la force centrifuge à l'élévation des eaux, et installées avec un certain art.

Ces appareils, quoique exposés par différents constructeurs, sont tous en quelque sorte de la même famille, et n'impliquent qu'une seule et même description. En effet, il importe assez peu que l'axe de rotation soit vertical ou horizontal, que les aubes soient en plus ou moins grand nombre et d'une courbure plus ou moins bien étudiée. Ce qu'il importe de constater, c'est que ces appareils sont tout simplement des turbines à réaction et sans adducteurs (c'est-à-dire la pire espèce de turbines), retournées en quelque sorte pour transformer le compteur hydraulique en une *machine élévatoire*.

Si l'on considère, en second lieu, que la vitesse à appliquer à l'axe de rotation augmente de plus en plus avec la hauteur à laquelle l'eau doit être élevée, que les frottements augmentent comme le carré de cette vitesse, et qu'enfin ils augmentent aussi à mesure que l'appareil prend des proportions de plus en plus petites, on sera amené à conclure que ces machines, même établies avec soin et intelligence, devront être réservées pour élever de grandes masses d'eau à de petites hauteurs.

Telle est en effet la conclusion à laquelle nous avaient conduit, en 1846, quelques expériences que nous avions été chargé de faire sur une pompe à force centrifuge analogue à celle de l'exposition anglaise, et construite par M. Dumoulin, breveté pour cette machine, qu'il nommait tromboïde.

Tuyaux de distribution d'eau du Palais de Cristal.

Ces tuyaux étaient munis de robinets que nous croyons nouveaux, et qui sont brevetés, en Angleterre, au nom de Jennings.

Imaginez sur une conduite ordinaire une coupure ou un intervalle dont la longueur dépend du diamètre de cette conduite; supposez cet intervalle occupé par un manchon en caoutchouc vulcanisé, serré par un fil de fer sur les deux parties de tuyaux en regard; supposez enfin ce manchon recouvert sur sa longueur par un autre manchon en métal, portant en son milieu une tubulure à vis, perpendiculaire à l'axe de la conduite, dans laquelle pénètre une vis de pression terminée par une demi-sphère d'un rayon égal à celui de la conduite. Cela posé, lorsqu'on veut laisser passer l'eau librement, on rentre dans son logement, ou tubulure, la vis de pression; lorsqu'on veut intercepter l'eau au contraire, fermer le robinet, on fait pénétrer la vis de pression, qui, appuyant par sa partie sphérique sur la face extérieure du manchon en caoutchouc vulcanisé, fait céder ce manchon et l'amène jusque contre la paroi opposée, où elle produit une occlusion complète. Nous ignorons jusqu'à quelle pression cette fermeture pourrait résister; mais à Hyde-Park, du moins, elle a parfaitement réussi.

Presses hydrauliques.

La grande presse hydraulique exposée par la *Bank quay Foundry Company*, de Warington, est une des pièces capitales de l'exposition. Elle peut élever un poids de 1,200 tonnes. C'est elle qui a servi, comme on le sait, au levage des tubes du *Britannia-Bridge*.

Les autres presses hydrauliques exposées, du moins celles que nous avons aperçues, ne renferment rien de nouveau, ni même de remarquable; mais, comme application intelligente et bonne installation de l'appareil, on doit citer la presse double employée pour l'épreuve des fermes en fonte du Palais de Cristal.

M. LE PRÉSIDENT invite ensuite M. Girard à donner quelques détails à la Société sur le principe et les propriétés de sa nouvelle turbine, dont les résultats d'expériences ont été promis par M. Callon.

M. GIRARD expose la différence radicale qui existe entre une turbine marchant *à réaction* et une turbine marchant par *libre déviation* de la veine. Il rappelle qu'Euler avait donné à sa turbine à réaction une hauteur précisément égale à la moitié de la hauteur de la chute et une vitesse relative nulle; il annulait complétement une cause de déperdition de force qui existe dans les turbines modernes à réaction, savoir, le jaillissement de l'eau par le jeu existant entre la couronne fixe et la couronne mobile. Ce jaillissement est produit par l'excès de pression de l'eau qui remplit la roue sur la pression extérieure; et cet excès de pression, à son tour, provient de ce que la hauteur de la turbine est toujours bien inférieur à la demi-hauteur de la chute.

Le principe de la libre déviation de la veine dans les canaux mobiles ou

récepteurs satisfait d'une manière générale à la condition qu'Euler n'avait remplie que pour un cas particulier de la turbine à réaction. Mais, pour pouvoir l'appliquer dans la pratique, non seulement lorsque la turbine marche dénoyée (ce qui n'arrive que lorsqu'on dispose, dans le cas de la turbine Fontaine, d'une chute à niveau invariable, ou bien, dans le cas de la turbine Fourneyron, d'une chute déterminée par la hauteur de la turbine), mais encore dans les circonstances bien plus fréquentes où la turbine est immergée, il fallait imaginer un moyen de faire tourner la turbine *sous l'eau sans être noyée*. C'est ce moyen, qui rappelle le procédé de la cloche à plongeur, que M. Girard a trouvé, et qui lui a fait donner à sa turbine le nom de turbine hydropneumatique.

Cette turbine possède encore une autre propriété, c'est celle de donner l'eau par des *vannes partielles* qui se lèvent toujours de toute leur hauteur, en nombre proportionné à la masse de l'eau actuellement disponible.

Cette idée, qui avait été brevetée en 1840 au nom de M. C. Callon, n'était aussi applicable que dans les cas, assez rares dans la pratique, comme nous l'avons déjà dit, d'une chute très élevée ou d'une chute à niveau invariable. L'hydropneumatisation imaginée par M. Girard rend la turbine à vannes partielles applicable à toutes les chutes, avec les avantages d'un *rendement constant* pour des variations de volume qui font baisser de moitié le rendement des turbines ordinaires.

M. GIRARD ajoute qu'il a imaginé un mécanisme très commode pour lever promptement et d'un point quelconque de l'usine les vannes de la turbine en tel nombre que nécessite la masse d'eau disponible.

Il termine son exposé en annonçant qu'il communiquera à la Société, dans une des prochaines séances, les plans et la description de sa turbine *hydropneumatique* avec vannage par soulèvements successifs, le tableau des expériences faites sur cette turbine, et enfin plusieurs projets de *barrages mobiles*, fondés également sur le principe très fécond de l'hydropneumatisation.

M. FAURE rend compte de celles des machines à moissonner qui, admises à l'exposition de Londres, lui ont semblé devoir être adoptées par la pratique.

Ces machines sont au nombre de deux, et toutes deux d'origine américaine.

La plus remarquable, celle qui à juste titre a obtenu la grande médaille, a été inventée par M. M'Cormich.

Elle se compose d'une sorte de traîneau conduit par une seule roue de $0^m.60$ environ de diamètre et $0^m.80$ de largeur de jante. Cette roue est supportée par un châssis, relié latéralement au traîneau, et muni à l'avant d'une flèche à laquelle viennent s'articuler des palonniers à la manière ordinaire.

L'appareil est traîné par un, deux ou trois chevaux, et le service se fait par un seul homme et deux enfants.

La face antérieure du traîneau, sur une largeur de $1^m.50$, est armée de dents parallèles en fer de lance formant peigne, et qui, à mesure que le traîneau s'avance, emprisonnent entre elles les épis.

Une scie rigide à dentelure fine et serrée, animée d'un mouvement recti-

ligne alternatif et agissant en dessous du peigne à la racine des dents, vient couper ces épis.

Enfin un rabatteur, composé de quatre voliges ou planches légères placées obliquement comme dans un dévidoir, est maintenu au dessus du traîneau, dont il embrasse toute la largeur. Ce rabatteur, animé d'un mouvement de rotation, courbe sur le plancher du traîneau les épis qui viennent d'être sciés; un enfant les ramasse, les dépose sur le sol, et le gerbage se fait à la manière ordinaire.

Le second enfant dirige les chevaux, et l'homme, veillant à la machine elle-même, régularise la position des épis s'ils sont couchés, et imprime à la fois le mouvement rectiligne alternatif à la scie et le mouvement rotatoire au rabatteur.

Un inconvénient du rabatteur est de faire échapper des grains de l'épi par un mouvement trop brusque, lorsque sa vitesse n'est pas parfaitement réglée; mais on y remédie en adaptant au traîneau une toile pour recevoir les grains.

La moisson se fait en commençant par la lisière du champ, et se continue ensuite par tranches parallèles de la largeur du traîneau.

La paille peut être coupée très près de terre et jusqu'à $0^{m}.08$ ou même $0^{m}.05$ de sa surface.

Avec un traîneau de $1^{m}.50$ de largeur, deux chevaux, un homme et deux enfants, on peut moissonner par heure 2 acres ou 80 ares de terrain.

Une telle machine est cotée au prix de 700 fr., mais il est probable que son prix de revient ne dépasse pas 450 à 500 fr. Outre l'économie considérable qu'elle procure dans l'opération de la moisson, elle présente encore l'immense avantage de moissonner précisément en temps opportun, ce qu'il n'est pas toujours possible de faire lorsque la moisson s'effectue, comme cela a lieu le plus ordinairement, par des populations entières qui se déplacent quelquefois très loin de leurs habitations et arrivent à époques fixes.

Une seconde machine à moissonner, exposée par MM. Garett et fils, se compose, comme la précédente, d'un traîneau, d'une série de dents et d'une scie; mais la dentelure de cette dernière, au lieu d'être fine et serrée, est formée de dents triangulaires juxtaposées qui coupent par leur portion inclinée.

Cette scie paraît devoir être inférieure à celle de M'Cormich, et surtout lorsque les épis ne sont pas encore très mûrs, et lorsque le matin ils sont encore couverts de rosée.

La machine Garett ne peut-elle pas rester en outre impuissante lorsque le blé est versé, tandis qu'avec quelques précautions, celle de M'Cormich doit pouvoir toujours fonctionner ?

L'idée des machines à moissonner n'est pas nouvelle; on en a déjà imaginé 7 ou 8 espèces, fondées sur le mouvement rotatoire ou alternatif d'une lame de faux, soit sur le principe des tondeuses héliçoïdales; mais aucune ne pouvait, comme celles dont il est question ici, fonctionner d'une manière satisfaisante dans les champs labourés en ados, ce qui est précisément le mode le plus usité pour le labourage des champs de blé dans les terres fortes et argileuses.

SÉANCE DU 7 NOVEMBRE 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

M. le président annonce que M. le Ministre de l'agriculture et du commerce a bien voulu faire remettre à la Société quelques uns des ouvrages dont peut disposer son département, comme témoignage de sympathie et de tout l'intérêt qu'il lui porte.

EXPOSITION DE LONDRES.

Chemins de fer.

M. BRIDEL communique à la Société de nouveaux renseignements sur l'exposition de Londres. Il classe de la manière suivante les appareils pour chemins de fer exposés au Palais de Cristal :

Voie.
Appareils pour mouvements de gare.
Matériel roulant.
Locomotives.

Voie.

On paraît s'être beaucoup occupé, en Angleterre, de perfectionner le mode d'établissement de la voie de fer.

On remarque les trois tendances suivantes dans les systèmes exposés :

1° Consolidation des joints des rails ;

2° Substitution du fer et de la fonte au bois employé dans la construction des supports ;

3° Augmentation de la surface par laquelle les rails reposent sur ces supports.

MM. Richardson, Robert, suppriment les traverses et coussinets de joint ; ils établissent une traverse intermédiaire à $0^m.30$ ou $0^m.40$ des extrémités de chaque rail ; puis ils assemblent ces rails au moyen de deux platines en fer de $0^m.45$ de long sur $0^m.08$ de large, logées des deux côtés de la partie droite, et réunies entre elles et avec le rail au moyen de quatre boulons. La forme de ces plates-bandes est telle, qu'elles s'appliquent exactement contre les faces des champignons qui avoisinent la tige. Il est probable que les trous percés dans les rails sont ovalisés afin de permettre la dilatation.

Les inventeurs assurent que leur système, appliqué par M. Adams au

chemin des Eastern-Counties, a donné d'excellents résultats, et a permis de remettre en service des rails complétement usés aux points où ils portaient sur les coussinets de joint.

MM. Samuel James ont exposé des coussinets de joint qu'ils proposent de substituer à ceux actuellement existants sans enlever les traverses. Ils suppriment la joue intérieure, comme cela se fait pour les changements de voie. La joue extérieure est prolongée des deux côtés de manière à remplacer l'une des platines du système précédent. Ils conservent la platine intérieure en fer et les quatre boulons de l'assemblage ; mais il est à craindre que les deux longues oreilles de la joue extérieure ne soient très sujettes à se rompre.

On a également proposé de faire venir ensemble à la fonte un coussinet de joint et deux coussinets intermédiaires, reliés par deux entretoises. Les coussinets intermédiaires seuls sont fixés sur des traverses, écartées de $0^{m}.70$ à $0^{m}.80$; le coussinet de joint est ainsi suspendu. Ces appareils, pour être assez résistants, doivent être fort lourds ; ils sont du reste difficiles à fondre, parce que les trois joues intérieures doivent s'appliquer bien exactement contre les rails.

D'autres supports de joint sont composés, pour chaque file de rails, d'un plateau de fonte avec nervures en dessous, et portant en dessus, sur toute sa longueur, qui est de 1 mètre environ, une joue extérieure continue. A l'intérieur, la joue est remplacée par une platine en fer ; le tout est assemblé au moyen de quatre boulons qui traversent la joue, les rails et la platine. Les supports des deux files de rails sont reliés par une tringle en fer.

Quelques uns de ces plateaux sont composés de deux parties symétriques qui embrassent exactement les rails. Les joues ne sont plus continues, mais forment deux coussinets intermédiaires écartés d'environ 1 mètre et un large coussinet de joint placé au milieu.

Ce dernier système doit être difficile à bien exécuter, parce qu'il faut obtenir à la fonderie une grande précision pour le logement des rails.

Tous deux sont du reste fort lourds.

Greaves, de Manchester, a exposé des traverses en fer et fonte fort remarquables.

Les coussinets, à peu près pareils à ceux qui sont employés sur nos chemins de fer, sont venus de fonte ou boulonnés au sommet d'une calotte sphérique en fonte d'environ $0^{m}.40$ de diamètre à sa base. A l'intérieur de la voie, ces calottes portent une nervure dans laquelle vient se loger l'extrémité d'une forte traverse en fer méplat, posée de champ. L'assemblage se fait au moyen de boulons. La construction a obtenu ainsi une grande résistance au dévers.

Enfin il signale une traverse en tôle, coudée en forme de gouttière à section trapézoïdale.

Les coussinets sont fixés sur ces traverses au moyen de boulons. En France, le poids d'un de ces appareils serait d'environ 40 kilog., en supposant que la tôle déployée ait $2^{m}.50$ sur $0^{m}.40$ et $0^{m}.05$ d'épaisseur.

Dans les systèmes dont il vient d'être question, on a fait remarquer une tendance à allonger les supports des joints. Ceux qui vont être décrits se rapprochent plutôt des voies posées sur longrines que de celles posées sur traverses.

MM. Samuel, James, ont exposé un deuxième mode de construction de la voie.

Leurs rails sont pris entre deux pièces de bois longitudinales, évidées de manière à embrasser ces rails jusqu'à $0^m.04$ ou $0^m.05$ de la surface de roulement du champignon supérieur. Ces pièces de bois sont logées dans une sorte de gouttière en fonte, de $0^m.08$ de largeur au fond, $0^m.10$ à la partie supérieure, $0^m.11$ de profondeur et environ 1 mètre de longueur, percée de trous au fond en plusieurs points pour l'écoulement des eaux. Deux nervures horizontales règnent extérieurement aux deux rebords supérieurs de la gouttière, de sorte que le tout a environ $0^m.40$ de large. D'autres nervures transversales placées en dessus consolident le tout. Enfin les supports des deux files de rails sont réunis par une petite tringle en fer dont les extrémités se logent dans des cavités venues de fonte sous les plateaux, et sont boulonnés dans ces cavités. Il y a trois supports semblables par rail de $4^m.50$; les joints sont consolidés au moyen de platines, comme dans le système Richardson.

Le but de MM. Samuel, James, est de supporter les rails sur une grande partie de leur longueur, d'éviter l'emploi du bois pour toute partie coûteuse à remplacer, sans toutefois le supprimer complétement, parce que, dans leur opinion, l'interposition d'un corps compressible entre les rails et le ballast est nécessaire.

La forme évasée qu'ils ont donnée à leurs gouttières a pour but de serrer très fortement la garniture en bois contre le rail; mais il est à craindre que, dans le cas d'un tassement inégal sous les supports d'un même rail, les supports se détachent. La tringle en fer s'oppose bien à l'écartement des rails, mais son efficacité pour empêcher le dévers est douteuse. Enfin le poids de la fonte par mètre courant de voie simple ne serait pas moindre de 160 kil.

Hoby a modifié d'une manière assez heureuse les supports que nous venons de décrire. La gouttière a une section analogue à celle de nos coussinets; le rail y est fixé au moyen de deux coins doubles placés à chaque extrémité, à l'extérieur du rail. Les deux joues latérales sont recourbées de telle façon que leur arêtes extrêmes se trouvent dans un plan horizontal inférieur au fond de la gouttière. L'une des nervures transversales est prolongée en dessous; elle est percée d'une mortaise, dans laquelle s'engage une barre de fer méplat placée de champ et reliant les supports des deux files de rails. Il chasse un coin en fer entre le fond de la mortaise et cette barre, de sorte que celle-ci se trouve appliquée contre les deux rebords et empêche tout dévers.

La voie proposée par M. W. K. Barlow pour le Great-Western est presque entièrement en fer. Elle se compose essentiellement d'un grand rail Brunel de $0^m.15$ de haut et $0^m.35$ d'empattement, posé directement sur le ballast.

Aux joints, les deux abouts des rails sont fixés, chacun au moyen de quatre boulons, sur un plateau en fer ou plus souvent en fonte de $0^m.35$ de large sur $0^m.50$ environ de long. Les plateaux en fonte ont de fortes nervures en dessous. L'écartement transversal des rails est maintenu par une barre de fer méplat d'environ $0^m,08$ sur $0^m,015$, boulonnée de champ contre l'une des nervures du plateau.

Le rail de M. Barlow repose sur le ballast par une large base de $0^{m}.35$ pour un mètre courant ; mais il présente latéralement une surface de $0^{mq}.10$ seulement pour résister aux actions qui tendent à déplacer la voie dans le sens transversal. Son poids est de 61 kil. pour un mètre courant ; mais il est, au dire de l'inventeur, trois fois plus fort que le rail à double champignon ordinaire. Il a très bien réussi sur le North Middland-Railway.

Si l'on parvenait à fabriquer des rails de cette espèce au même prix que les rails ordinaires, il suffirait d'en réduire le poids à 54 kil. pour que le prix d'établissement de la voie en France fût le même qu'avec le système ordinaire.

APPAREILS POUR LES GARES.

Plaques tournantes.

Des deux plaques tournantes exposées une seule mérite d'être citée.

C'est une plaque à plateau mobile en fer portant sur des galets fixes. Ce plateau mobile se compose d'un disque en tôle d'environ $0^{m}.008$ d'épaisseur, lequel porte la voie unique formée de deux rails Brunel, fixés au moyen de rivets. Un cercle de roulement en fonte est rivé sous ce disque, qui est en outre consolidé par trois nervures en fer à T perpendiculaires aux rails et par une traverse en fonte qui porte le pivot. Les galets sont fixes, disposition qui présente ici peu d'inconvénients, parce que l'on peut faire porter tout le poids de la plaque sur le pivot.

On remaque en outre un dessin et un modèle de plaque tournante pour machine et tender, basée sur un principe entièrement nouveau, et qui mérite quelque attention.

Cet appareil se compose d'une grande caisse cylindrique en tôle (de 11 mètres de diamètre) supportée en son milieu par un pivot. Cette caisse, convenablement consolidée par des cloisons intérieures, supporte la voie ; elle est logée dans une cuve en maçonnerie étanche remplie d'eau. L'assise qui forme le couronnement de la cuve est en retraite ; une plaque de fonte recouvre le vide annulaire ainsi obtenu. Enfin la petite languette de la deuxième assise supporte un chemin de fer circulaire. Douze galets, dont les axes tournent dans des supports fixés à la caisse flottante, font saillie sur le pourtour de cette caisse, et sont engagés dans la rainure circulaire formée par le couronnement en fonte. Le diamètre de ces galets est un peu moindre que la distance du couronnement au chemin de fer circulaire.

Quand la plaque n'est pas chargée, la pression de l'eau la soulève jusqu'à ce que les galets s'appuient contre le couronnement en fonte, qui sert ainsi de cercle de roulement.

Quand, au contraire, on amène une machine sur la plaque, la pression de l'eau est insuffisante pour la soulever, et les galets portent sur le cercle de roulement inférieur.

Chariots de service.

Les chariots de service en usage sur la plupart des chemins de fer ne peu-

vent desservir les voies principales, parce que leur établissement forcerait à interrompre ces voies.

Le chariot hydraulique du Great-Western et celui du chemin de Lyon ne participent pas à cet inconvénient, mais ils sont coûteux d'établissement et d'entretien.

Dunn, de Manchester, a exposé l'appareil fort simple et fort ingénieux que nous allons décrire.

La voie transversale sur laquelle roule le chariot se compose de six files de rails plats, à deux rebords seulement, dont le fond est établi au niveau des voies principales. Ces rails sont interrompus au droit de chacune de ces voies sur une longueur suffisante pour ne pas gêner le passage des roues de voiture.

Le chariot proprement dit se compose d'un cadre en tôle porté par douze galets à jante plate, qui roulent dans les rails à ornière de la voie transversale. Ces galets sont disposés sur quatre rangées, de telle sorte que l'une des rangées se trouvant au dessus des interruptions de la voie, les trois autres portent sur cette voie. Les deux longs côtés du cadre sont parallèles aux rails des voies principales; ils portent à leur partie inférieure et sur toute leur longueur une sorte de cornière sur laquelle repose le rail du chariot. La face supérieure de ce rail se trouve ainsi élevée de $0^{m}.05$ seulement au dessus de la voie. Afin de racheter cette légère différence de niveau, quatre plans inclinés de $1^{m},20$ de longueur environ viennent raccorder les abouts des rails du chariot avec ceux de la voie. Ces plans inclinés sont mobiles autour des charnières verticales fixées contre les petits côtés du cadre, de sorte que l'on peut à volonté les appliquer contre ces petits côtés ou les amener dans le prolongement des rails.

Les joints des charnières, au lieu d'être plans, sont héliçoïdaux; il en résulte que les plans inclinés, repliés contre les petits côtés du cadre, sont assez élevés pour ne plus rencontrer les rails. Pour faire monter une voiture sur le chariot ou pour la faire descendre de ce chariot, on déploie les plans inclinés; on les replie quand on veut rouler le chariot d'une voie au droit d'une autre voie.

Le chariot exposé par Ormerod, de Manchester, ressemble beaucoup à celui que nous venons de décrire. La voie transversale se compose de trois files de rails. Le chariot est supporté par six galets inégalement espacés, afin d'éviter les chocs au passage des interruptions que présente la voie transversale.

Le chariot se compose d'un premier châssis en tôle formé de deux longueurs et de six traverses groupées deux à deux de manière à reposer sur les axes des galets.

Un second châssis entoure le premier; ses longerons portent des rails semblables à ceux de Dunn. Ces longerons sont reliés près de leurs extrémités par deux traverses en tôles, en quatre autres points de leur longueur, par des entretoises en fer rond.

Les deux entretoises du milieu ne sont écartées que de $0^{m}.70$ environ; elles portent dans des étriers fixés sous les longerons du châssis intérieur. La voie du chariot se trouve ainsi suspendue à $0^{m}.05$ environ au dessus des rails principaux; un faible effort suffit pour la faire osciller autour de l'une ou l'autre entretoise.

Quand le châssis est horizontal, le chariot roule sur la voie sans rencontrer d'obstacles; quand il est incliné, les rails viennent se raccorder avec ceux des voies principales, et forment ainsi un plan incliné sur lequel on fait monter les voitures avec la plus grande facilité. Le mécanisme au moyen duquel on élève ou l'on baisse le châssis extérieur se compose de coins qu'on manœuvre au moyen de leviers.

Le chariot d'Ormerod paraît convenir aux lignes dont le matériel est lourd.

M. Colladon, ancien professeur à l'Ecole centrale des arts et manufactures, invité à assister à la séance, donne ensuite quelques renseignements sur la construction des planimètres : il pense que l'emploi de cet instrument est la méthode la plus sûre et la plus prompte pour les relevés cadastraux, les calculs sur les volumes des déblais ou des remblais, etc.

L'invention du planimètre remonte à 1825 ; il est à peu près certain que MM. Conello, de Florence, et Oppikofer, de Berne, l'ont imaginé en même temps. M. Erst, de Berlin, n'a été que le constructeur de l'appareil de M. Oppikofer.

L'exposition de Londres contenait quatre planimètres : un de M. Conello, un d'un constructeur anglais, un d'un Allemand et un de M. Wettli, ingénieur de Zurich.

Celui de M. Conello a eu la médaille de 1re classe, comme étant le premier construit ; celui de M. Wettli a eu une médaille de 2e classe, comme le plus parfait, le plus exact et le plus facile à manier.

Des expériences faites à Vienne par une commission d'ingénieurs ont prouvé que le planimètre de Wettli, quand il est manié par une main un peu exercée, donne des résultats exacts à 1/1500e près.

Un membre ajoute que l'on voit au Conservatoire un planimètre de M. Erst et un dynamomètre totalisateur très curieux à étudier.

SÉANCE DU 21 NOVEMBRE 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

EXPOSITION UNIVERSELLE DE LONDRES.

Wagons.

M. BRIDEL communique à la Société de nouveaux renseignements sur l'exposition de Londres.

Avant l'établissement du chemin de fer de Rouen, dit-il, les boîtes à

graisse des wagons étaient rigoureusement guidées par les plaques de garde.

Sur le chemin de Rouen et sur toutes les lignes construites depuis, on leur a donné un jeu assez considérable.

Enfin, M. Lechatelier décrit, dans son ouvrage sur les chemins de fer d'Allemagne, des wagons dans lesquels les plaques des gardes sont complétement supprimées.

On remarquait à l'exposition une grande voiture à huit roues qui se rapprochait, par son mode de suspension, de celle dont parle M. Lechatelier. Le châssis de cette voiture était composé de deux châssis ordinaires, assemblés bout à bout. Les boîtes à graisse étaient fixées, comme dans nos wagons, sous les ressorts, au milieu de leur longueur; mais le châssis était suspendu à ces ressorts par de doubles menottes en fer articulées, qui permettaient un grand développement, soit dans le sens transversal, soit dans le sens longitudinal.

Le constructeur a conservé les plaques de garde, mais seulement dans la prévision d'une rupture des suspensions; aussi les boîtes à graisse flottaient-elles très librement dans ces plaques de garde. On dit que cette voiture parcourt sans danger des courbes de 75 mètres de rayon.

UN MEMBRE affirme avoir voyagé sans aucun mouvement de lacet dans des voitures accouplées et suspendues au moyen de menottes brisées. Ces voitures présentaient dans les boîtes à graisse, et surtout dans le sens transversal, un très grand jeu, qui allait jusqu'à 8 et 12 centimètres. Le but de l'accouplement de deux voitures est de résister par une plus grande masse aux mouvements qui produisent le lacet; celui des menottes brisées et du jeu des boîtes à graisse est de permettre aux roues de se déplacer sur la voie sans entraîner les caisses.

Ces voitures étaient très douces; le seul inconvénient qu'on pourrait leur reprocher serait l'accouplement de deux voitures lorsque les besoins du service n'en réclameraient qu'une seule, ou encore la difficulté de leur faire faire les mouvements de gare aussi facilement que lorsqu'elles sont séparées. En Angleterre, où la circulation est très active, ces inconvénients ont peu d'importance; mais en France, où les trains se forment et se déforment journellement, l'emploi de ce système serait moins praticable.

Quant à la prétention de parcourir facilement des courbes de 75 mètres de rayon, elle peut paraître exagérée; et d'ailleurs, si on en excepte les mouvements de gare, cet avantage sera peu important tant que les locomotives elles-mêmes ne s'y prêteront pas.

Il est ensuite question des plaques de garde pour wagons à marchandises employés sur le North-Western. Elles se composent principalement d'une barre de fer plat laminé, contournée en fer à cheval, dont les deux branches rectilignes servent de guides aux boîtes à graisse. On encolle au bout de ces deux branches des contrefiches, également en fer plat, qui sont boulonnées à leur autre extrémité sur les brancards. Enfin on relie les pointes des plaques par des entretoises ou une barre d'écartement, comme dans le système ordinaire.

Comme solidité, ces nouveaux appareils ne laissent rien à désirer, car le fer y est employé partout de la manière la plus avantageuse, et les points

d'attache sont très écartés. Leur prix de revient est bien inférieur à celui des plaques en tôle, parce que la matière première est moins chère, et parce que, à force égale, ils sont plus légers. Enfin, ces plaques étant très solidement attachées, on pourrait sans doute supprimer les barres d'écartement, dont l'utilité même, dans le mode de construction ordinaire, est assez problématique. On fait en ce moment des essais de ce genre au chemin de fer d'Orléans.

DEUX MEMBRES constatent que ces plaques sont surtout avantageuses sous le rapport de l'économie de fabrication. En Angleterre, elles se vendent à des prix peu différents des prix du fer laminé; il est vrai que les contrefiches ne sont que grossièrement encollées sur les extrémités de la partie en fer à cheval.

En France, on ne se contenterait sans doute pas d'un travail aussi peu soigné; mais, à l'aide de quelques modifications dans le mode de fabrication et dans la disposition des plaques elles-mêmes, on parviendrait sans peine à établir ces nouvelles plaques dans d'excellentes conditions de solidité et à des prix beaucoup inférieurs à celui des plaques en tôle actuellement en usage.

Chaines de sûreté.

On a remarqué sur plusieurs chemins de fer que les chaînes de sûreté se brisent presque toujours quand elles entrent en action; aussi commence-t-on à les supprimer. Quelquefois on les remplace par une chaîne unique, qui agit au milieu de la largeur du châssis; on évite ainsi les tractions obliques qui, dans le système ordinaire, résultent du passage dans les courbes ou d'une différence de longueur des deux chaînes.

UN MEMBRE ajoute qu'au chemin de fer d'Alsace il a attaché les chaînes de sûreté sur le ressort de traction même, de sorte que, quand l'attelage se rompait, les chaînes de sûreté agissant sur ce ressort n'éprouvaient pas un choc aussi brusque et ne se brisaient pas.

On fait observer que, puisque les chaînes de sûreté ne fonctionnent pas d'une manière satisfaisante et qu'elles peuvent être la cause de dangereux accidents, le remède le plus radical serait de les supprimer tout à fait, et de profiter ainsi, au moins pour les wagons à marchandises, d'une certaine économie qui résulterait de cette suppression. Sur plusieurs chemins anglais, on s'est contenté d'exagérer les dimensions des crochets pour éviter leur rupture.

On signale aussi l'emploi de la tôle ondulée comme très fréquent en Angleterre; on l'a appliquée à quelques uns des wagons exposés. Les parois ou couvertures en tôle ondulée sont continues et fixées extérieurement à la carcasse de la caisse; elles donnent ainsi de la rigidité à la charpente et préservent les assemblages; mais elles sont fort lourdes.

UN MEMBRE fait observer que la tôle s'emploiera pour ces usages plus facilement en Angleterre qu'en France, à cause de la différence de prix pour le fer et pour le bois, et il ajoute que les wagons en fer, en général, doivent présenter ce grave inconvénient d'être, lorsqu'ils ont été déformés, très coûteux à réparer.

Freins.

Un seul mérite d'être cité. Il se compose de quatre sabots fixés à l'extrémité de leviers dont les points fixes sont pris sur les boîtes à graisse ; on manœuvre ces leviers par l'intermédiaire de bielles, d'arbres à manivelles et de vis, comme les sabots des freins qui enraient les roues.

Les sabots agissent en pressant directement sur les rails ; ils soulèvent donc le wagon et le transforment en un traîneau.

Le principe de ce frein n'est pas nouveau, mais les détails en sont fort simples. Au chemin de Eastern-Counties, on l'adapte aux machines-tenders qui sont actuellement en construction dans les ateliers de la Compagnie.

Roues.

Plusieurs constructeurs anglais ont exposé des roues à moyeux forgés pour machines et pour wagons.

1° Les roues de Becoroft, Bultler et compagnie, dont les rais sont remplacés par deux disques en tôle légèrement coniques, sont embouties sur toute leur circonférence de manière à présenter une sorte de faux-cercle. On supprime les rivets des bandages en munissant ceux-ci d'une nervure intérieure en forme de queue d'hyronde. Le moyeu est disposé de façon à présenter au milieu de sa longueur une saillie annulaire ; les disques embrassent la queue d'hyronde et la saillie du moyeu. L'assemblage est fait au moyen de rivets qui traversent les trois épaisseurs. Les mêmes constructeurs ont exposé également des roues dont les moyeux sont faits comme ceux des machines Crampton.

2° Dans d'autres roues, on donne à leurs bras une section circulaire ou elliptique ; tantôt ils sont dans un même plan, tantôt ils forment deux surfaces coniques dont les sommets se trouvent sur l'axe du moyeu.

Le raccordement des rais avec le moyeu et avec la jante se fait moins naturellement quand ils ont la forme circulaire que dans le système ordinaire.

3° Les trois modèles exposés par Had sont d'une fabrication économique.

Le premier mode de construction a été proposé en France, il y a quelques années, par M. Crampton. Les rais sont en fer plat, coudés ; ils sont soudés tous ensemble entre deux rondelles rapportées pour former le moyeu ; la jante s'obtient en soudant un coin entre l'extrémité d'un rais et le coude de l'autre. L'attache des rais sur le moyeu, présentant, d'un côté, un congé très doux, de l'autre côté un refouillement aigu, ne satisfait pas complétement.

Les rais du deuxième modèle sont également en fer plat ; ils sont doubles, comme dans les roues coudées à moyeu en fonte. La continuité de la jante est obtenue en soudant des coins entre les coudes des rais ; d'autres coins forment le remplissage du moyeu.

Le troisième mode de construction exige l'emploi de barres laminées dans

des cylindres spéciaux ; mais il donne les plus beaux produits. Chaque rais est double comme dans la roue précédente ; mais la barre qui le forme porte à chacune de ces extrémités un secteur du moyeu.

On conçoit aisément que l'on puisse, à l'aide de ce procédé, donner à toutes les parties de la roue la forme et les dimensions convenables ; ainsi l'on peut donner à la jante une épaisseur supérieure à celle des bras, et raccorder ces bras au moyeu.

Roues en bois.

Sur le North-Western et le South-Western, on emploie des roues en bois qui figuraient à l'exposition.

Le système du South-Western est le plus simple ; il se compose d'un grand nombre de secteurs en bois de bout assemblés au milieu sur un moyeu en fonte, et emmanchés à l'aide de la presse hydraulique dans le bandage qui est alésé (1).

Les rivets sont supprimés et remplacés par deux cercles en fer à rebord boulonné sur le bois, et dont les nervures s'engagent dans deux rainures pratiquées à l'aide du tour sur les deux faces latérales du bandage.

Ce système est un peu compliqué ; néanmoins il est rationnel, car le bandage est également soutenu dans toute sa longueur. L'expérience seule peut apprendre si le bois résiste convenablement aux actions qui tendent à le déformer et à le mâcher. S'il devenait nécessaire de resserrer le bandage, on pourrait intercaler une tôle entre ce bandage et le disque en bois.

Un membre rappelle que M. Arnous avait aussi exposé un petit modèle de roues à raies en bois.

Les constructeurs anglais avaient d'abord compté que les roues en bois présenteraient la propriété de ne pas faire de bruit en roulant, et, dans l'origine, on les appelait, pour cette raison, roues silencieuses ; mais on a reconnu depuis que plusieurs d'entre elles ne méritaient pas cette épithète, précisément à cause du bruit qu'elles font par suite du rétrécissement du bois à la chaleur et du jeu qui en résulte. Ces roues, qui pourraient être employées dans les pays régulièrement humides, ne pourraient pas l'être dans ceux où elles seraient exposées à des alternatives d'humidité et de sécheresse.

Cependant, dans ce dernier cas, on pourrait peut-être obtenir quelques succès par l'emploi de bois comprimés et préparés par un procédé analogue à celui qui est appliqué sur le chemin de fer d'Orléans à Bordeaux pour la fabrication des coins et chevilles employés sur les voies. On a observé d'ailleurs que les bandages calés sur bois, comme sont ceux de M. Verpillieux et de M. Clément Désormes, ne cassent pas et s'usent beaucoup moins vite ; leur durée serait de 25 0/0 au moins plus grande que celle des bandages ordinaires.

UN MEMBRE ne croit pas que l'on doive accorder à ce système une con-

---

(1) En Allemagne on a construit des roues en bois sur le même principe ; mais le bandage était posé à chaud. On enduisait le bois de terre glaise délayée en bouillie très fine ; on posait le cercle à la manière ordinaire et on le refroidissait par un jet d'eau continu.

fiance absolue, attendu que le décalage d'un ces bandages en pleine marche en aurait mis les inconvénients à découvert.

UN AUTRE MEMBRE signale la facilité du calage en bois, lequel se fait en enfonçant le bois à refus et le lardant de cales obliques en fer de dimensions telles qu'elles occupent la moitié de l'espace compris entre la roue et le bandage.

On fait observer que le chemin de Tours à Nantes fait l'essai de ce système, et que, depuis dix-huit mois que les roues sont en service régulier, elles n'ont pas été retournées, quoiqu'elles aient déjà effectué un parcours considérable. Ce système a été également appliqué avec succès à des roues de machines sur le chemin de fer de Versailles (rive gauche).

UN MEMBRE pense que le calage en bois est le seul qui rende possible l'emploi des bandages en acier, en empêchant leur rupture.

On fait observer que le calage en bois paraît bien préférable à l'emploi des roues entièrement en bois, les grandes dimensions des bois nécessaires à la confection de ces roues les rendant trop susceptibles d'être influencés par les circonstances atmosphériques.

On ajoute que, si l'on parvenait à préparer convenablement les bois, le meilleur système serait un calage sur bois de bout : il éviterait le bruit, diminuerait le poids des roues de 3 à 400 kilog. par wagon, et serait plus économique que les systèmes actuellement employés, tant comme frais de premier établissement que comme entretien des bandages.

On ajoute que les bois employés en Angleterre pour la fabrication des roues sont des bois des îles, rougeâtres, très durs et très résistants.

UN MEMBRE pense que ce sont les mêmes bois qui ont été récemment offerts pour traverses à des prix assez modérés, quoique encore trop élevés pour ce dernier usage.

UN AUTRE MEMBRE croit que ce sont des bois d'acajou de qualité inférieure à celle que l'on emploie pour l'ameublement.

On considère l'acacia et le chêne comme excellents pour les rais des roues.

UN MEMBRE trouve que le frêne français est un des bois les plus résistants ; il a l'avantage de faire ressort, et s'emploie en général dans la carrosserie pour des pièces qui exigent de la résistance et de l'élasticité. Il n'a que le défaut de s'échauffer assez promptement ; mais on remédierait à cet inconvénient par l'application des procédés connus.

UN MEMBRE profite de l'occasion de la question du calage des roues pour appeler l'attention de la Société sur l'emploi des machines à colonnes d'eau pour la mise au rond des bandages et le cintrage des roues, en profitant tout simplement d'un des réservoirs d'eau établis dans tous les ateliers de chemins de fer. Par un tuyau communiquant au réservoir d'un côté et à un cylindre de l'autre, et au moyen du jeu d'une manette correspondant à une distribution d'eau, on obtient, sans vapeur, une manutention très économique.

L'emploi de la pression de l'eau se rattache d'ailleurs en Angleterre à un système tout à fait général.

On revient ensuite à la description des roues du North-Western, qui sont plus compliquées que celles dont il vient d'être question.

Ces roues se composent de six disques circulaires en bois disposés symétriquement autour du moyeu. La forme de ce moyeu est telle qu'il suit exactement le contour du polygone intérieur formé par les disques. Ceux-ci sont en outre serrés au moyen de boulons entre deux rondelles, dont l'une est venue de fonte avec le moyeu. Enfin les vides extérieurs formés par la juxtaposition des disques reçoivent des coins en fonte serrés dans ces intervalles par des boulons dont les écrous sont logés dans de petites cavités ménagées dans le moyeu.

Le diamètre des disques est tel que le cercle qui leur serait circonscrit soit notablement plus grand que le diamètre intérieur du bandage. On porte la roue sur le tour et on la ramène au diamètre convenable, de sorte que les disques sont tronqués par un cercle dans lequel porte le faux bandage. Ce faux bandage est en fer à deux rebords, il n'est pas soudé; on fixe le bandage au moyen de six rivets à clavettes; ces clavettes sont logées dans une virole encastrée au centre de chaque disque.

Les roues du North-Western sont extrêmement lourdes; elles présentent un grand nombre d'assemblages compliqués, et ne soutiennent pas le bandage aussi uniformément que celles du South-Western.

UN MEMBRE pense que l'application de ce système a été faite pour éviter le retrait des bois, mais il le trouve beaucoup trop compliqué.

SÉANCE DU 12 DÉCEMBRE 1851.

Présidence de M. AUGUSTE PERDONNET.

UN MEMBRE donne communication d'une note sur les expériences de chauffage faites sur le calorifère de l'église Saint-Roch par M. Grouvelle.

On fait remarquer que dans cette note il y a un fait très curieux, c'est celui de toutes les ouvertures qui se trouvent à la partie supérieure de l'église, dont la surface totale, égale à 14 mètres carrés, et placée à 11 mètres en moyenne au dessus du sol, permet cependant le chauffage. Si l'on calcule l'appel produit par une cheminée de cette dimension, on trouve qu'il est tel, qu'il n'y aurait pas de chauffage possible économiquement, et cependant l'expérience est là qui prouve le contraire. Il en faut nécessairement conclure que l'air ne peut traverser ces innombrables petites fentes de 2 millimètres: en effet, on constate que c'est à peine si des courants peuvent s'établir à travers des fentes de 1 à 2 centimètres; mais ce résultat est encore si surprenant, que, si l'on avait soupçonné l'existence de toutes ces ouvertures, dont la surface totale atteint 14 mètres carrés, on n'aurait probablement pas entrepris ce chauffage.

L'auteur de la note a remarqué que les seules ouvertures où la vitesse de

l'air ait été appréciable sont les trous de $0^{m}.07$ de diamètre établis pour le passage des cordes qui supportent les lustres.

UN MEMBRE ajoute qu'il ne passe presque pas plus d'air à travers une toile métallique, que cet air soit projeté sur cette toile avec une grande ou une petite vitesse, parce que le frottement augmente avec la vitesse dans un très grand rapport.

On a cependant beaucoup vanté et employé en Angleterre un système de ventilation au moyen de toiles métalliques et de vitres séparées par de petites fentes. Les expériences que l'on vient de citer prouvent que ce système ne doit donner qu'un très faible résultat.

UN AUTRE MEMBRE constate que les toiles métalliques, celles, par exemple, que l'on emploie dans les diligences des chemins de fer, détruisent bien les courants d'air, mais n'apportent pas d'obstacles à sa circulation.

On répond qu'il y a passage de l'air lorsqu'il est appelé par une aspiration de l'extérieur à l'intérieur; mais qu'en sens inverse, ce passage se remarque moins, surtout lorsque l'air arrive avec vitesse. Ainsi, lorsqu'on souffle sur une toile métallique, l'air ne la traverse qu'en petite quantité.

UN MEMBRE explique ce résultat par l'épanouissement du jet; il ajoute que dans tout mouvement il se produit un remou. Ainsi, en projetant une toile métallique ou simplement un balai au centre d'un liquide en ébullition tumultueuse, on calme cette ébullition. Il pense que c'est par une cause analogue que les digues en pierre sèche, qui calment la violence d'un torrent, sont plus solides et tiennent mieux que les digues en maçonnerie.

On rappelle également que l'ébullition tumultueuse d'une grande chaudière peut aussi être apaisée par la projection d'un corps gras, d'une simple goutte d'huile. C'est le procédé employé par les fabricants de sucre pour empêcher les sirops de déverser. Franklin avait cru remarquer qu'un effet semblable se produisait sur les vagues de la mer, et on avait même, à la suite de cette prétendue découverte, proposé d'armer de bouteilles d'huile les chaloupes de sauvetage.

UN MEMBRE appelle l'attention de la Société sur un autre fait; c'est que, pour de grands monuments à murs épais, il est préférable d'opérer le chauffage par intermittence, et même à des intervalles assez éloignés. Ainsi, à Saint-Roch, il convient de faire fonctionner le calorifère sans interruption de nuit et pendant trois à quatre jours, puis de le laisser chômer complétement le même temps. C'est un fait nouveau dans l'art du chauffage.

Il signale également que, lorsque les températures intérieures et extérieures sont très différentes, l'ouverture d'une porte de 15 à 28 mètres carrés de surface ne produit pas d'abaissement sensible sur un thermomètre placé dans le voisinage de cette porte; les deux couches d'air chaud et froid restent pour ainsi dire juxtaposées sans se mélanger. Il en conclut qu'il serait très difficile, sans employer des moyens puissants, d'établir dans ces monuments une ventilation d'été, qui serait pourtant bien autrement importante que le chauffage d'hiver pour la conservation des monuments et la santé des personnes qui les fréquentent.

UN AUTRE MEMBRE cite cependant la ventilation du temple juif, de dimension moindre que celle de l'église Saint-Roch. Cette ventilation se produit au moyen de deux cheminées concentriques de 8 mètres de hauteur, à

partir des combles où se fait le feu. La cheminée intérieure est terminée par une base étroite qui entraîne facilement l'air introduit dans le temple par des canaux inférieurs à grande section.

En faisant fonctionner cet appareil, lorsque le temple était vide de monde, on a obtenu une ventilation de 8,000 mètres cubes d'air, et lorsque, au contraire, le temple était plein, la circulation de l'air a été jusqu'à 10,000 mètres cubes, avec une vitesse de $3^{m}.85$ à 4 mètres; la température est restée constante depuis le matin jusqu'au soir, et égale à la partie supérieure comme à la partie inférieure. On a enfin remarqué que, lorsqu'on ouvrait les portes, il s'introduisait dans l'édifice une quantité d'air froid très considérable.

On pense que ces faits ne contredisent nullement ceux que l'on a cités précédemment; la différence d'effet provient du tirage d'appel, qui n'existe pas dans le cas du chauffage de l'église; l'air extérieur alors ne tend pas à se précipiter à l'intérieur, et les deux masses d'air chaud et froid juxtaposées à l'ouverture de la porte, et à peu près à la même tension, ne tardent pas à se mélanger.

Quant à la faible différence de température que l'on constate entre l'air supérieur et l'air inférieur, on se l'explique par la résistance qu'apportent à l'introduction de la petite masse d'air froid par les fissures les courants volumineux d'air chaud qui tendent à la relever.

SÉANCE DU 26 DÉCEMBRE 1851.

Présidence de M. Eugène Flachat, *vice-président.*

Cette assemblée générale est celle dans laquelle le trésorier rend ses comptes, et où le Bureau et le Comité sont renouvelés par l'élection pour l'année suivante.

L'ordre du jour appelle l'exposé du trésorier sur la situation financière de la Société.

M. Loustau, trésorier, constate que le nombre des sociétaires, qui était, au 20 décembre 1850, de 228
s'est augmenté, par suite de nouvelles admissions, de 14

Ce qui porte ce nombre, au 26 décembre 1851, à 242

Les versements effectués pendant l'année 1851 se sont élevés à	8,650 fr.	65 c.
Les dépenses, pendant la même année, ont été de . .	7,009	90
Solde en caisse au 26 décembre 1851.	1,640	75

Le trésorier engage les membres retardataires à verser au plus vite leur arriéré, dont le chiffre total s'élève à 1,456 fr.

Il engage en outre tous les sociétaires à répondre à l'appel qui leur a été fait par le Bureau et le Comité en apportant à la caisse un supplément de cotisation volontaire, et il rappelle que les membres du Bureau et du Comité ont donné l'exemple en versant une première somme de 1,225 fr.

Le Président met aux voix l'approbation des comptes. Cette approbation est adoptée.

Les élections ont donné le résultat suivant :

Bureau.

Président :	M. Eug. Flachat.
Vice-Présidents :	MM. E. Vuigner,
—	C. Callon,
—	J. Petiet,
—	C. Polonceau.
Secrétaires :	MM. A. Bellier,
—	L. Yvert,
—	Mathieu,
—	Gerder,
Trésorier :	M. Loustau.

Comité.

MM. Faure,	MM. Mony (Stéphane),
Cavé,	Thomas (Léonce),
Yvon-Villarceau,	Bois (Victor),
Salvetat,	La Salle,
Nozo,	Pepin-Lehalleur,
Degousée,	A. Barrault,
Houel,	M. Alcan,
Bergeron,	Calla,
Seguin (Paul),	Evrard,
Knab,	Chobrzinski.

SÉANCE DU 9 JANVIER 1852.

Présidence de M. Eugène Flachat, *président.*

L'ordre du jour appelle la lecture du mémoire de M. Love sur la résistance du fer et de la fonte, basée sur les recherches expérimentales les plus récentes faites en Angleterre.

Il en résulterait que depuis vingt ans il n'a été presque rien ajouté en France aux données pratiques fournies par Duleau et Tredgod sur la résistance du fer et de la fonte.

En Angleterre, au contraire, on a travaillé la question, et l'on a reconnu que les anciennes formules et les expériences faites en vue de déterminer *le point où l'élasticité du métal était altérée* ne présentaient pas assez de certitude.

C'est à M. Hodgkinson que sont dues les principales recherches; toutes les expériences qu'il a faites, il les a poussées jusqu'à la rupture, et c'est de ce point qu'il est parti pour établir toutes ses formules de résistance.

Mais, si les expériences de M. Hodgkinson sont irréprochables, il n'en est pas toujours de même de ses formules. Ainsi, certaines d'entre elles n'ont pas une forme commode pour les praticiens. Elles ont été remplacées par d'autres d'une application plus facile. En outre, des lacunes importantes avaient été laissées par l'expérimentateur; l'auteur du mémoire s'est encore efforcé de les combler. Ces lacunes consistaient dans l'absence de formules générales de la résistance des piliers creux, carrés ou rectangulaires, et des poutres creuses en tôle.

DU FER ET DE LA FONTE SOUMIS A LA TRACTION.

Au moment où les expérimentateurs anglais ont repris l'étude des propriétés du fer et de la fonte, il était admis :

1° Que dans certaines limites le fer ou la fonte, sous l'action de charges croissantes, s'allongeaient régulièrement et proportionnellement à la charge;

2° Qu'il existait un point appelé limite d'élasticité où cette loi cessait d'exister et où l'allongement augmentait dans une proportion plus rapide que la charge; en outre, à partir de ce point, le métal conservait un allongement permanent, c'est-à-dire que, la charge étant enlevée, il ne revenait pas à sa longueur primitive;

3° Que sous la même charge le fer s'allongeait plus que la fonte;

4° Qu'il y avait dans les esprits une tendance à croire que, dans la seconde phase de l'élasticité du métal, il se trouvait un point assez éloigné de celui où se produisait la rupture instantanée, où l'action de la charge prolongée pendant un certain temps augmentait sans cesse l'allongement observé, et finissait par provoquer la rupture;

5° Enfin on admettait que la résistance du fer et de la fonte, dans des échantillons de même calibre, mais de provenances diverses, variait assez peu pour qu'on pût prendre une *moyenne de résistance*.

La plupart de ces opinions se trouvent modifiées, et, d'après les nouvelles expériences, il faudrait admettre :

1° Que la proportionnalité entre l'allongement et la charge n'existe pas;

2° Qu'un allongement permanent se manifeste sous les plus petites charges, et qu'il n'y a par conséquent pas de *limite d'élasticité*;

3° Que sous la même charge la fonte s'allonge plus que le fer;

4° Que le fer et la fonte, soustraits aux chocs ou aux vibrations, suppor-

tent indéfiniment les charges les plus voisines de celles capables de produire la rupture instantanée ;

5° Que la diversité de résistance des mêmes matériaux ne permet pas de compter sur une *moyenne de résistance.*

Enfin, il paraîtrait, d'après les expériences de M. Brunel, que la nature cristalline ou fibreuse du fer ne serait pas un indice absolu de sa résistance et de sa qualité.

ALLONGEMENT DU FER ET DE LA FONTE.

Pour l'allongement des barres soumises à un certain poids, M. Hodgkinson a déduit de ses expériences la formule ci-contre, qui donne l'allongement en fonction du poids et de la longueur primitive de la barre ; cette formule est pour la fonte :

$$P = 969{,}568\,\frac{a}{L} - 188{,}500{,}268\,\frac{a^2}{L^2}.$$

a représente l'allongement.

P est exprimé en kilogrammes, a et L en centimètres, d'où :

$$a = L\left(0{,}002\,571\,794 - \sqrt{0{,}00\,000\,661\,412 - 0{,}00\,000\,000\,530\,503P}\right)$$

Pour le fer

$$a = \frac{l}{1\,934\,565}.$$

Si l'on applique ces formules à des barres de fer et de fonte de même section et de même longueur, on trouve que pour une barre de 10 mètres et sous une charge de 1000 kilog., la fonte s'est allongée de $1^{cm}.373$.

Et le fer de $0^{cm}.516$.

C'est-à-dire que, dans ce cas, la fonte s'allonge près de trois fois autant que le fer.

RÉSISTANCE FINALE DU FER ET DE LA FONTE A LA RUPTURE PAR TRACTION.

Les limites des variations de rupture de la fonte sont très étendues ; elles ont été de $7^k.77$ à $18^k.11$ par millimètre carré. On voit par là le peu de valeur des moyennes ; mais ces variations sont beaucoup moins sensibles pour des fontes de même provenance, et elles donnent la mesure du degré d'approximation que l'on peut espérer obtenir d'une formule pratique.

Le fer présente les mêmes anomalies que la fonte.

D'après Rondelet et Soufflot, les variations allaient de 18 à 92 kilog. par millimètre carré ; aujourd'hui il n'y a pas d'expériences qui dépassent 60 kilog. pour le fer au bois le mieux travaillé, et 33 kilog. pour les fers laminés obtenus au charbon minéral. En écartant le chiffre extrême de 92 kilog.,

nous aurions encore deux limites *maxima* et *minima* beaucoup plus éloignées l'une de l'autre que pour la fonte.

M. Stephenson a confirmé, par ses expériences, les résultats cités par Navier sur la résistance de la tôle travaillant soit dans le sens du laminage, soit perpendiculairement à ses fibres.

Enfin, M. Hodgkinson a trouvé par expérience ce que la théorie démontre, c'est-à-dire que, lorsqu'une barre est tirée suivant une ligne tracée sur sa surface au lieu de l'être suivant son axe, sa résistance diminue des deux tiers.

DU FER ET DE LA FONTE SOUMIS A LA COMPRESSION.

Les observations générales présentées plus haut sur l'opinion accréditée et sur les nouvelles bases résultant d'expériences nombreuses relatives à la traction s'appliquent entièrement au fait de la compression.

La formule qui, déduite des observations, donne le raccourcissement d'une barre, est pour la fonte :

$$r = L\left(0{,}0\,119 - \sqrt{0{,}000\,125\,387 - 0{,}0\,000\,000\,246P}\right).$$

Pour le fer :

$$r = \frac{PL}{1\,621\,231}.$$

P est exprimé en kilogrammes, r et L en centimètres.

Si l'on soumet des barres de fer et de fonte de 1 centimètre carré de section et de 10 mètres de longueur à une charge de 1000 kilog., on trouve un raccourcissement de $1^{cm}.16$ pour la fonte, et de $0^{cm}.678$ pour le fer.

Ainsi donc, pour le raccourcissement comme pour l'allongement, c'est la fonte qui travaille le plus. Ce résultat est tout à fait opposé aux idées reçues jusqu'à ce jour.

RÉSISTANCE A LA RUPTURE PAR COMPRESSION.

Les expériences de M. Hodgkinson, faites sur dix-sept espèces de fonte, ont donné pour résistance moyenne par millimètre carré $60^{k}.267$, tandis que chez nous on admet généralement 10 kilog.

Dans ces expériences, la hauteur de la barre était de une fois et demie à 4 fois la largeur de la base ; c'est du résultat obtenu dans ces circonstances que l'on part pour établir les formules de résistance des piliers ou colonnes.

Ici encore les variations de résistance ont été très grandes ; la fonte qui a le moins résisté a cédé sous la charge de $38^{k}.86$ par millimètre carré, et celle qui a le plus résisté a pu supporter $84^{k}.67$. Le fer et la fonte, sous la forme de prismes ou de cylindres dont la hauteur ne dépasse pas quatre ou cinq fois le diamètre, se comportent différemment sous des efforts de compression. La fonte éclate en plusieurs morceaux ; le fer s'aplatit visiblement en se gonflant vers le milieu de sa hauteur, puis se gerce. Dans le premier cas,

rien n'est plus facile que de saisir le point de rupture ; dans le second, ce point est au contraire difficile à déterminer. Il paraîtrait cependant que l'on peut fixer à 40 kilog. par millimètre carré la résistance maximum à la compression du bon fer en barre et à 38 kilog. celle de la tôle de bonne qualité ayant de 1/2 millimètre à 15 millimètres d'épaisseur.

L'auteur a continué la lecture de la partie de son Mémoire qui a trait à la résistance des piliers. Il rend compte des expériences de M. Hodgkinson et des formules qu'il en a tirées. Il discute ces formules et en propose d'autres obtenues par un procédé différent de celui qui a été suivi par l'expérimentateur.

Cette partie de la résistance du fer et de la fonte, étant de la plus grande importance, sera reprise en entier dans la séance prochaine, avec la partie relative à la résistance du fer et de la fonte à un effort transversal.

SÉANCE DU 23 JANVIER 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

M. Love reprend la lecture de son mémoire sur la résistance du fer et de la fonte, basée principalement sur les recherches expérimentales les plus récentes faites en Angleterre.

RÉSISTANCE DES PILIERS OU COLONNES.

Les seuls renseignements que l'on possède en France sur ce sujet et que l'on trouve dans les auteurs qui traitent de la résistance des matériaux, consistent dans un tableau que nous rapportons ci-après, et qui donne les résistances décroissantes des colonnes en fer et en fonte, à mesure que le rapport de leur longueur à leur diamètre augmente ; et deux formules de Tredgold, que l'on a considérées à tort comme des formules empiriques, et qui sont, au contraire, le résultat d'une théorie particulière sur la résistance des piliers.

DÉSIGNATION des MÉTAUX.	Densité.	Rapport de la longueur de la pièce à la plus petite dimension transversale ou $\frac{L}{D}$				
		au dessous de 12	12	24	48	60
Fonte	7.21	10,000	8,333	5,000	1,666	833
Fer	7.79	4,900	4,084	2,450	516	408

FORMULES DE TREDGOLD.

Résistance d'un pilier en fonte de longueur L et de diamètre D :

$$P = \frac{230D^4}{1.24D^2 + 0{,}00\,039L^2}.$$

Résistance d'un pilier en fer de longueur L et de diamètre D :

$$P = \frac{267D^4}{1.24D^2 + 0{,}00\,034L^2}.$$

Suivant l'auteur du mémoire, le tableau ci-dessus est inexact et il se trouve en désaccord complet avec les formules de Tredgold : ce qui n'empêche pas qu'on les trouve à côté l'un de l'autre dans les mêmes auteurs, comme s'ils donnaient des résultats concordants.

Relativement aux formules de Tredgold, M. Love ne conteste pas absolument qu'elles puissent, dans certains cas très rares, donner des résultats d'accord avec l'expérience ; mais il fait, aux auteurs qui les ont rapportées, le reproche d'avoir négligé d'avertir le praticien des circonstances où elles peuvent s'appliquer et de la valeur des résultats obtenus. Ainsi, il paraîtrait, d'après Tredgold lui-même :

1° Que ses formules ne sont applicables qu'à des colonnes dont la longueur excède 30 fois le diamètre, et composées d'une fonte dont la résistance maximum à la compression par centimètre carré atteint 10,000 kilog.;

2° Qu'elles ne donnent que le 1/3 du poids de rupture ;

3° Qu'elles supposent la résultante des pressions dirigée suivant une génératrice, au lieu de l'être dans la direction de l'axe du pilier.

Or, d'après les expériences de M. Hodgkinson, un pilier pressé comme le suppose Tredgold perd les 2/3 de sa résistance. De sorte que les formules en question ne représentent que le neuvième de la résistance du pilier à bases planes pressé suivant l'axe. Il suit de là qu'un ingénieur habitué à des formules qui donnent la résistance finale à la rupture, et ignorant les circonstances qui viennent d'être énumérées, multiplierait par le coefficient de sécurité 3 ou 4 le poids P, et se trouverait ainsi, à son insu, avoir déterminé le diamètre d'une colonne capable de supporter 27 ou 30 fois la charge permanente qui lui serait destinée.

M. Hodgkinson a déduit de ses expériences des formules qui ne sont autres que les formules théoriques d'Euler, dans lesquelles il a introduit un coefficient pratique et des exposants fractionnaires un peu différents de ceux théoriques. Ces formules sont d'une application incommode, car le diamètre du pilier y entre à la puissance 3.60 et la longueur à la puissance 1.70. En outre, elles ne sont pas disposées pour s'adapter aux résistances variables des fontes de provenances diverses. Enfin, elles ne s'appliquent qu'à des piliers dont la longueur atteint 30 fois le diamètre. Pour des piliers plus courts, M. Hodgkinson a composé une formule particulière dépendante de

la formule des piliers longs et qui s'accorde assez bien avec les résultats de l'expérience.

En partant des expériences de M. Hodgkinson, M. Love a obtenu des formules beaucoup plus simples et qui ont, en outre, d'après lui, l'avantage d'être générales, c'est-à-dire de s'adapter aussi bien aux piliers courts qu'aux piliers longs. Il met sous les yeux de la Société le tableau des expériences de M. Hodgkinson, dans lequel il a placé en regard les poids de rupture de l'expérimentation et ceux calculés par ses formules nouvelles, et il montre que ces résultats s'accordent avec l'expérience, dans les limites qu'il est possible d'atteindre actuellement en pratique; limites qui ont été déterminées dans la partie du mémoire lue dans la séance précédente.

Si l'on applique ces formules à deux séries de piliers de 1 cent. carré de section, l'une en fonte et l'autre en fer, la première présentant une résistance maximum à la compression de 8,000 kilog., la seconde une résistance de 4,000 kilog., la hauteur des piliers étant comprise entre 10 et 100 fois le diamètre, on trouve :

DÉSIGNATION des MÉTAUX.	Rapport de la longueur de la pièce à la plus petite dimension transversale ou $\frac{L}{D}$										
	au dessous de 5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Fonte. . .	8,000	4,476	2.859	1,784	1,168	1,013	588	445	351	277	230
Fer. . . .	4,000	2.300	2,285	2,000	1,702	1,428	1,194	1,000	842	714	610

D'après le premier tableau, qui sert encore de guide aux praticiens français, il résulterait que, tant que la longueur du pilier n'atteint pas 12 fois son diamètre, le métal conserve sa résistance maximum à la compression, tandis que, d'après le dernier, dressé par M. Love, cette résistance n'est plus que la moitié environ de la résistance maximum lorsque la longueur du pilier n'est encore égale qu'à dix fois le diamètre seulement. En outre, il suivrait encore du premier tableau que la fonte conserve pour toutes les longueurs la supériorité qu'elle a sur le fer dès le commencement; suivant le dernier, au contraire, le fer l'emporterait sur la fonte dès que la longueur du pilier atteindrait 30 fois son diamètre. Ce fait nouveau, qui découle des nombreuses expériences de M. Hodgkinson, explique et justifie la préférence donnée par les ingénieurs anglais au fer sur la fonte, dans certaines de leurs constructions les plus récentes.

M. Love entre ensuite dans les détails les plus circonstanciés sur la marche qu'il a suivie pour obtenir les nouvelles formules. La méthode consiste d'abord à disposer les résultats des expériences de M. Hodgkinson dans un ordre particulier, capable de faire ressortir la manière dont se comportent, les uns par rapport aux autres, les divers éléments de la résistance des pi-

liers ; puis à rechercher si les évolutions de ces éléments, convenablement combinés entre eux, peuvent être représentées par une courbe d'une forme régulière. Il fait voir que l'on arrive par ce moyen à une courbe parfaitement définie, appartenant à la forme parabolique et représentée par l'équation générale $Y = AX^m + B$: et en y introduisant les valeurs de A et de m déduites des expériences, il obtient finalement une formule générale d'une forme très simple, dans laquelle le diamètre et la longueur du pilier entrent seulement à la seconde puissance.

PILIERS CREUX CYLINDRIQUES.

Les résultats fournis par l'expérience permettent de considérer, sans erreur appréciable, la résistance d'un pilier creux cylindrique, en fonte ou en fer, comme étant égale *à la différence des résistances de deux piliers pleins, de même longueur, et ayant respectivement pour diamètre : le premier le diamètre extérieur, le second le diamètre intérieur du pilier creux proposé.*

PILIERS CREUX CARRÉS OU RECTANGULAIRES EN FER.

Il paraîtrait que M. Hodgkinson n'a pas tiré grand parti de ses expériences nombreuses sur la résistance des tubes en fer à section carrée, rectangulaire, etc. Il en a conclu que la résistance de cette sorte de piliers n'était assujettie à aucune loi. M. Love a trouvé, au contraire, que cette résistance pouvait être exprimée assez exactement par la formule :

$$R = \frac{A + B'}{2} + B,$$

dans laquelle R désigne la résistance totale du pilier proposé ;

A celle de deux parois opposées, calculées comme si elles appartenaient à un pilier plein ayant les dimensions extérieures du pilier creux ;

B′ celle de ces mêmes parois, calculées séparément comme deux piliers rectangulaires, ayant pour épaisseur celle de la tôle des tubes, et pour hauteur, la dimension transversale de ce tube perpendiculaire à ces parois ;

B la résistance des deux autres parois, calculée de la même manière que B′.

L'auteur du mémoire fait observer ici que, quoique cette règle paraisse compliquée au premier abord, elle est néanmoins d'un emploi très facile, puisqu'elle consiste purement et simplement dans trois applications successives de sa formule générale des piliers pleins dont il vient d'être question.

Il a appliqué cette règle à tous les cas d'expériences de M. Hodgkinson, et il montre, dans un grand tableau disposé à cet effet, que les résultats du calcul cadrent d'une manière suffisamment approchée avec ceux de l'expérience.

L'analogie qui existe entre les lois de résistance du fer et de la fonte lui fait supposer qu'une formule semblable donnerait la résistance des tubes en

fonte carrés ou rectangulaires. Mais il pense que cette formule serait plus simple et se réduirait à $R = A + B$.

A et B auraient des valeurs analogues à celles décrites précédemment. Il resterait seulement à déterminer quelle hauteur il faudrait attribuer au pilier rectangulaire dont B représente la résistance.

Il rapporte ensuite les résultats des expériences de M. Hodgkinson sur l'influence qu'exerce sur la résistance des piliers longs la manière dont leurs extrémités sont terminées ou fixées. On remarque entre autres faits importants celui-ci : c'est qu'un pilier dont les extrémités sont planes et solidement assises offre une résistance trois fois plus grande que celui dont les extrémités sont arrondies.

Comme on le pense bien, la forme de la section a aussi une grande influence sur la résistance. Ainsi, par exemple, M. Hodgkinson a trouvé que la forme adoptée pour les bielles de machines à vapeur à balancier présente une résistance moitié de celle qu'aurait une bielle à section égale uniformément cylindrique.

FLEXION DES PILIERS.

M. Hodgkinson a conclu de ses expériences, contrairement aux idées généralement reçues avant lui, que les piliers devaient commencer à fléchir sous les plus petites charges. De ces mêmes expériences, M. Love a déduit un fait important, qui semble avoir échappé à M. Hodgkinson : c'est que la flèche du pilier correspondante à la charge de rupture n'atteignait jamais la moitié du diamètre de ce pilier. Il en a conclu qu'au moment où le pilier atteint son maximum de résistance, aucune partie de la section n'est encore soumise à un effort de traction, et que, par conséquent, toutes les théories de la résistance des piliers basées sur cette hypothèse qu'une partie de la section est, *à ce moment*, comprimée, et l'autre tirée, sont fausses.

Il en résulte aussi, suivant l'auteur du mémoire, qui entre à cet égard dans quelques développements, que l'on ne peut tirer le moindre enseignement de l'aspect présenté par la section de rupture sur le mode de résister du solide. Il fait voir ensuite que l'hypothèse ancienne, qui consiste à regarder les solides comme divisés en tranches parallèles et perpendiculaires à l'axe, ne peut rendre compte du phénomène de la flexion, et il l'explique par une nouvelle hypothèse basée en partie sur la manière dont s'effectue la rupture d'un prisme trop court pour éprouver une flexion. Au reste, il fait remarquer que les formules qu'il a obtenues sont tout à fait indépendantes de cette hypothèse, ou de toute autre qu'il plairait à un physicien d'imaginer pour expliquer la flexion des colonnes ou piliers.

DU FER ET DE LA FONTE SOUMIS A UN EFFORT TRANSVERSAL.

M. Love examine d'abord le cas des solides pleins en fer et en fonte, à section rectangulaire et reposant par leurs extrémités sur des appuis, et il trouve que, pour mettre la formule connue d'accord avec les expériences par traction et par effort transversal sur des barreaux présentant environ

6cq, 50 de section, il faut substituer le coefficient numérique 1/3 au coefficient reçu 1/6. C'est parce que ce coefficient, déduit de la théorie pure, est inexact, que l'on a trouvé, en expérimentant sur des barreaux par effort transversal, une valeur de la résistance à la traction à peu près double de celle que donne l'expérimentation directe par traction.

Mais, pour que la formule soit applicable à des barreaux en fonte de divers calibres, il ne suffit pas d'en changer le coefficient ; car, à mesure que le calibre augmente, le taux de la résistance à la traction qui entre dans cette formule baisse rapidement. Pour tenir compte de cette nouvelle circonstance, M. Love a trouvé, par tâtonnements, qu'il suffit de multiplier le résultat donné par la formule par le facteur (1.18—0,07D), D désignant la plus petite des deux dimensions transversales du barreau.

Les coefficients numériques des formules applicables aux autres solides à section pleine circulaire, triangulaire, etc., doivent aussi être modifiés comme il vient d'être dit pour la section carrée ou rectangulaire. De plus, l'auteur du mémoire fait remarquer, en terminant cet article, que c'est à tort que les auteurs français admettent que deux solides ayant même section triangulaire, dont l'un reposerait sur une arête et l'autre sur une de ses faces, présentent la même résistance. L'expérience prouve que ce dernier est beaucoup plus résistant.

SOLIDES ÉVIDÉS EN FER. — PONTS TUBULAIRES.

Les solides à section creuse ou évidée *en fer* ont le même coefficient numérique que les solides à section pleine dont ils dérivent. En outre, la formule théorique doit subir une autre modification, qui consiste, pour les solides à section carrée ou rectangulaire, dans la suppression de la hauteur H au dénominateur ; de plus, les hauteurs extérieure et intérieure H et H′ ne doivent entrer au numérateur qu'à la 2e puissance. Enfin, le solide pouvant céder par traction ou par compression, suivant la disposition adoptée et le mode d'assemblage, la formule, au lieu de la résistance à la traction, doit contenir l'une ou l'autre des deux résistances, suivant le cas. Pour déterminer celle des deux qu'il faut adopter, F désignant sa valeur, voici comment on doit opérer, d'après M. Love :

1° Calculer le taux de la résistance à la traction de la partie inférieure du solide, en tenant compte de l'affaiblissement résultant du mode d'assemblage des parties ;

2° Calculer le taux de la résistance à la compression de la partie supérieure comme si elle faisait partie d'un pilier creux carré ayant pour côté la dimension horizontale et transversale du tube proposé, et supposer que le tube doit céder latéralement ;

3° Introduire pour F, dans la formule, la plus petite des deux résistances trouvées.

M. Love a calculé par cette règle les tubes expérimentés par M. Hodgkinson, offrant les dimensions les plus variées. Il a fait dresser un tableau de ses expériences, dans lequel il a figuré, sur une échelle proportionnelle, la section exacte de ces tubes. Il appelle successivement les résultats de l'ex-

périmentation et ceux du calcul placés en regard les uns des autres, et montre qu'ils sont aussi approchés que peuvent l'être des résultats de ce genre.

La même règle s'applique également aux cas où les tubes, au lieu de présenter une épaisseur de tôle uniforme, ont la partie inférieure plus épaisse que la partie supérieure, aussi bien qu'à ceux où ces parties ont la forme cellulaire, comme dans les ponts de Conway et de Menai. Seulement, dans ce dernier cas, il faut ramener le tube à la forme rectangulaire simple, en supposant la masse de fer des cellules concentrée et répartie également de chaque côté de la ligne qui passe par le centre de gravité des cellules.

En outre, une chose essentielle à noter dans le cas où le toit et le plancher du tube sont d'une épaisseur inégale, c'est que la hauteur intérieure H′ n'est pas égale à $H-(e+e')$ comme on pourrait le croire, mais bien à $H-2e''$, e'' désignant l'épaisseur de la partie par laquelle le tube doit céder d'après la règle ci-dessus.

SÉANCE DU 6 FÉVRIER 1852.

Présidence de M. E. Flachat.

M. Love continue la lecture de son mémoire sur la résistance du fer et de la fonte.

RÉSISTANCE DES POUTRES ÉVIDÉES EN FONTE DE FORMES DIVERSES.

Il fait remarquer que les poutres sont de trois espèces : 1° celles qui dérivent de la forme carrée ou rectangulaire, et que l'on obtient en évidant intérieurement ou extérieurement des poutres pleines à section carrée ou rectangulaire, ce qui donne des solides évidés ayant soit la forme d'un tube ou celle connue sous le nom de forme double T ; 2° celles qui dérivent des solides circulaires ou elliptiques pleins ; 3° enfin celles que l'on obtient en évidant intérieurement ou extérieurement un solide plein, de section triangulaire.

Les formules applicables à ces divers cas ont la même forme que les formules applicables au fer, avec cette différence que le taux de la résistance qui y entre est toujours celui de la résistance à la traction. En outre, les coefficients numériques au lieu d'être les mêmes que ceux des solides pleins primitifs, n'en sont que les 0.70. Enfin la valeur de H′ est toujours égale à H, moins deux fois l'épaisseur du renfort inférieur.

Outre ces trois catégories de solides de formes usitées en pratique, il en est une quatrième imaginée par M. Hodgkinson, et qui consiste en une

poutre à deux renforts inégaux qui doivent être dans le rapport de 1 à 5 ou 6, pour présenter la plus grande résistance possible, et que M. Love examine particulièrement sous ce titre :

DE LA MEILLEURE FORME A DONNER A UNE POUTRE EN FONTE.

Suivant M. Hodgkinson, la meilleure forme, c'est-à-dire celle qui utilise mieux le métal sous le rapport de la résistance, est celle qu'il a imaginée. Il fonde cette opinion sur des expériences comparatives qu'il a faites entre des poutres de cette forme et celles présentant la forme de deux renforts égaux ou à un seul renfort. Mais il paraît que la comparaison établie par M. Hodgkinson n'est pas tout à fait juste; car, dans sa poutre, il réduit la tige verticale à n'être plus que le 1/7e environ de la section totale, en reportant l'excédant de matière sur les renforts, tandis qu'il refuse le bénéfice de cette disposition aux autres. C'est ainsi que, dans la poutre à deux renforts égaux de Tredgold, la tige verticale est près de la moitié de la section totale. Si l'on redresse cette comparaison de manière que les diverses poutres comparées ne diffèrent plus qu'en ce qui concerne le système particulier auquel chacune d'elles appartient, on trouve que la plus résistante est celle à un seul renfort inférieur; celle de M. Hodgkinson à deux renforts inégaux vient en seconde ligne, et celle de M. Tredgold à deux renforts égaux en troisième.

M. Love termine ce qui est relatif aux poutres en fonte par des applications à des poutres de ponts de chemins de fer. Dans l'une de ces applications, il trouve l'occasion de faire voir que, lorsque les dimensions en épaisseur de la poutre dépassent 2 centimètres 1/2, le poids de rupture donné par la formule doit être réduit par l'application du facteur $(1{,}18 - 0{,}07D)$, dont il a déjà été question.

Toutes les formules qui entrent dans le mémoire de M. Love se rapportent aux cas de charges statiques. Pour se mettre à l'abri de tout accident, lorsqu'il s'agit de déterminer les dimensions d'une poutre, il faut faire entrer dans ces formules, à la place du poids de rupture, 3 fois la plus grande charge que cette poutre aurait à supporter en repos, et 6 fois cette même charge si elle devait être animée d'une grande vitesse.

Le mémoire se termine par un appendice dans lequel l'auteur donne le modèle d'un tableau qui devrait être dressé par MM. les ingénieurs des mines pour arriver à connaître les résistances du fer et de la fonte de toutes les usines françaises, et les diverses circonstances qui ont pour effet de faire varier ces résistances dans des limites aussi étendues que celles dont il a été question dans le cours du mémoire. Ces circonstances étant mieux connues, on pourrait seulement alors trouver le moyen d'apporter dans les procédés chimiques et mécaniques de la fabrication des modifications telles que le taux de la résistance devînt plus uniforme, sinon plus élevé.

Après cette lecture, un membre fait alors remarquer qu'il serait nécessaire que l'auteur du mémoire fît connaître la méthode suivie par M. Hodgkinson pour faire ses expériences, ainsi que les divers détails des opéra-

tions. Il rappelle que les barres expérimentées pour connaître la résistance à la traction avaient 3 mètres de longueur et étaient suspendues à la charpente du bâtiment dans lequel on opérait. Les résultats obtenus de cette manière sont remarquables par leur faiblesse, puisque les ruptures se sont produites sous une charge moyenne de 10 à 12 kil. par millimètre carré de section. Il lui semble que ces résultats ne peuvent être donnés que par des corps cristallisés, présentant des textures très variables dans leur longueur. — Il dit à ce sujet qu'on a fait chez MM. Pinart frères, à Marquise, pour le compte de la Compagnie de Saint-Germain, des expériences analogues à celles de M. Hodgkinson; mais on a expérimenté sur des barreaux beaucoup plus courts. Ils avaient $0^{m},25$ de longueur et $0^{m},020$ de diamètre. Généralement ils ont cédé à la traction sous un effort de 16 à 19 kil. par millimètre carré de section ; tandis que, parmi les longs barreaux expérimentés par M. Hodgkinson, ceux qui étaient en fonte stirling (fonte qui est le résultat d'un mélange) sont les seuls qui aient atteint un effort de 18 kil. environ avant de céder à la traction. Il faudrait donc en conclure que la longueur des barres a une influence sur leur résistance à la traction.

De plus, il lui semble que la détermination du coefficient de résistance de la fonte, suivant son épaisseur, aux efforts de traction, n'est pas susceptible d'être donnée par une formule, car on a remarqué que dans les moulages, tandis que l'intérieur d'une pièce, étant cristallisé et à facettes, est peu résistant, la croûte extérieure, au contraire, présente beaucoup plus de résistance. Elle semble avoir reçu, par le refroidissement subit, une espèce de trempe. Quand les pièces sont épaisses, le sable est plus échauffé et la croûte résistante est plus profonde ; son grain est fin et serré sur une plus grande épaisseur. Le coefficient constant ne serait encore applicable qu'autant que la surface de la fonte serait refroidie aussi rapidement, ce qui n'est pas le cas.

Les ingénieurs de la marine soumettent à des épreuves toutes les pièces de fonte qu'ils reçoivent : leur méthode consiste à presser sur ces pièces posées sur deux supports. Cette méthode, qui a pour but d'obtenir des valeurs relatives, est bonne pour obtenir les résultats que ces ingénieurs se proposent; mais elle est trop spéciale, et ressemble en ce point aux méthodes anglaises, qui consistent toujours à faire des expériences en vue seulement du travail que l'on doit exécuter, mais qui ne généralisent jamais, de sorte que, quand on ne se trouve pas dans des circonstances identiques avec celles qui ont accompagné leurs expériences, on ne peut guère tirer parti des résultats obtenus. En France, au contraire, où l'on ne peut consacrer beaucoup de capitaux à des expériences relatives à chaque cas particulier de construction, il faut chercher à faire des expériences plus générales et à tirer de celles qui sont faites tout le parti possible. C'est là un des services les plus importants que le mémoire qui vient d'être lu est appelé à rendre.

Quant à la résistance des matériaux à l'écrasement, les expériences que l'on devrait faire sont très compliquées et très coûteuses.

Il ne reste guère que celles qui sont faites en vue de la résistance à la traction qui puissent être entreprises chez nous, et il y a lieu de les suivre avec le plus grand soin.

UN AUTRE MEMBRE fait remarquer que, jusqu'à présent, toutes les théories sur la résistance des matériaux ne se préoccupent, dans le cas d'un solide encastré, que d'écrire deux équations d'équilibre qui comprennent comme forces le poids du solide, la charge qu'on veut lui faire supporter et les résistances moléculaires de la partie non encastrée. Il croit qu'on a tort de ne pas écrire une troisième équation, dans laquelle on ferait entrer les résistances des actions moléculaires de la partie encastrée dans le plan même qui sépare la partie encastrée du solide de celle qui ne l'est pas.

Il rappelle, à ce sujet, qu'il a été étonné que M. Navier, dans son Cours de mécanique, ait négligé dans ses applications cette troisième équation.

UN AUTRE MEMBRE fait remarquer que Navier, dans son ouvrage, commence par poser les trois équations, mais qu'il néglige ensuite l'une d'elles dans les applications qu'il en a faites, parce que, dans les cas qu'il a consignés, elle peut en effet être négligée.

UN MEMBRE fait observer qu'en effet la remarque qui vient d'être faite relativement à l'oubli de la troisième équation d'équilibre a une grande valeur quand on veut faire jouer à l'encastrement un rôle important dans la résistance, ce qui doit avoir lieu lorsque les solides employés sont très longs, et qu'au lieu d'être formés d'une seule pièce, ils se composent d'un assemblage de plusieurs morceaux. Il rappelle que c'est cet effort, de la plus haute importance, que les ingénieurs anglais qui ont construit les ponts tubes de Menai et de Conway ont appelé l'effort tranchant, et qui leur a permis de déterminer exactement la gradation d'épaisseur qu'il fallait donner aux parois de ces tubes, en employant des tôles très épaisses près des points d'appui et plus minces au milieu des portées, tandis que le haut et le bas ont, au contraire, des épaisseurs plus grandes au milieu des portées qu'aux approches des points d'appui.

L'auteur du mémoire répond ensuite aux observations qui lui ont été adressées sur son travail. Il fait remarquer que les expériences faites par M. Hodgkinson sur de grandes barres de 15 mètres de long avaient pour but de constater que, même sous de faibles charges, la fonte s'allonge quand on la soumet à des efforts de traction, et de faire connaître exactement l'importance de cet allongement; mais que, pour déterminer la résistance des pièces à ces efforts de traction, on n'avait opéré que sur des barreaux qui avaient seulement $0^{m}.50$ de longueur.

Quant à la faiblesse que l'on impute aux résultats de M. Hodgkinson, il fait remarquer que c'est une erreur : car, si les plus faibles poids de rupture n'ont été que de 7 kil., quelques uns ont été jusqu'à 18 kil. Il persiste à croire que les poids de 16 à 19 kil., qui lui ont été indiqués comme étant la résistance des fontes françaises en général, sont peut-être exceptionnels, comme ceux de 18 k. qui ont été obtenus en Angleterre; que, d'ailleurs, on ne serait pas fort éloigné du résultat qu'il indique, surtout si l'on se rappelle que les expériences anglaises ont été faites sur trente-quatre espèces de fonte, aussi bien sur celles du Yorkshire, du Straffordshire et de l'Ecosse, que sur celles du Midi; tandis que celles qu'on lui cite n'ont été faites que sur des fontes de l'usine de Marquise, et que, par conséquent, elles tendraient seulement à prouver que les fontes de cette provenance présentent une grande résistance à la traction; mais elles ne peuvent pas donner une idée de la résistance

moyenne des fontes en France. Il rappelle, à ce sujet, que MM. Minart et Desormes ont fait, il y a trente ans, des expériences assez nombreuses sur les fontes françaises, d'après lesquelles il résulte une moyenne générale un peu inférieure à celle trouvée par M. Hodgkinson.

SÉANCE DU 20 FÉVRIER 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

THÉORIE DE LA COULISSE STEPHENSON.

M. Phillips, ingénieur des mines, a la parole pour une communication relative à la théorie qu'il a faite pour expliquer le jeu de la coulisse Stephenson dans les machines locomotives.

Il commence par établir que, pour chaque cran de la détente, les barres d'excentriques impriment à la coulisse des mouvements de rotation successifs autour de certains centres instantanés de rotation. Il fait voir que, pour chaque position, ces centres instantanés se trouvent à l'intersection de la bielle de suspension avec la ligne qui joint le centre de l'essieu moteur et le point d'intersection des deux barres d'excentriques prolongées, si c'est nécessaire, dans la position qu'elles occupent au moment que l'on considère. Il fait voir ensuite que, ce centre instantané étant connu, en le prenant comme centre pour décrire 2 petits arcs de cercle ayant chacun pour rayon les distances du centre instantané aux points d'attache des barres d'excentriques avec la coulisse, et cherchant ensuite l'intersection de ces deux petits arcs par deux autres décrits des extrémités des rayons d'excentricité comme centres et avec les barres d'excentriques comme rayons, on peut arriver à faire une épure séparée pour chacun des crans de détente.

Il dit que, d'après des considérations déduites de sa théorie, et qu'il indiquera plus tard, l'on peut se borner, en général, à faire l'épure une fois, et qu'il suffit ensuite de mener des horizontales par les points de la coulisse qui répondent aux divers crans de détente, pour avoir, avec une exactitude bien suffisante, la marche pour chaque cran.

AVANCE LINÉAIRE DU TIROIR.

Il serait important, quand on parcourt les divers crans de détente, que l'avance linéaire du tiroir ne variât pas. Pour obtenir une avance constante, la

théorie indique que, quand le piston est à l'une des extrémités de sa course telle que les barres d'excentriques ne se rencontrent qu'en arrière de l'axe moteur, le rayon de fabrication de la coulisse serait donné par la formule

$$R = \frac{cd}{c - r\sin\theta},$$

dans laquelle c est la 1/2 longueur de la coulisse, d la longueur des barres d'excentriques, r le rayon d'excentricité, et θ le complément de l'angle de calage; et que, quand le piston est à l'autre extrémité de sa course, où les barres d'excentriques se rencontrent en avant de l'axe moteur, le rayon de fabrication est donné par la formule

$$R' = \frac{cd}{c + r\sin\theta}.$$

Or, R est plus grand que la distance entre le centre de l'essieu moteur et la coulisse, et R' est plus petit que cette même distance. Il s'ensuit que la théorie indique que, pour avoir une avance du tiroir constante pour les deux extrémités de la course du piston et pour chaque cran de la détente, il faut satisfaire à deux conditions incompatibles.

On pourrait donc, dans la pratique, prendre pour le rayon de fabrication de la coulisse une moyenne entre R et R', ce qui donnerait

$$R_1 = \frac{c^2}{c^2 - r^2\sin^2\theta}.$$

Mais il est encore plus exact de chercher le rayon qui établit une moyenne entre les différences qui auront lieu aux deux extrémités de la course du piston. Quand on cherche ce rayon, on trouve précisément $R_1 = d$. Ainsi, le véritable rayon de fabrication de la coulisse doit être égal à la longueur des barres d'excentriques, résultat que l'expérience avait déjà indiqué. Il s'ensuit que, quand le système de distribution est celui des barres droites, l'avance linéaire du tiroir augmente à mesure qu'on détend davantage; et que, quand on emploie des barres croisées, cette avance diminue à mesure qu'on détend davantage : dans les deux cas, les variations de cette avance sont toujours plus faibles que la flèche de la courbure de la coulisse. M. Phillips indique, du reste, le moyen de calculer, pour chaque cran de détente, ces variations, qui sont la différence des flèches répondant au rayon théorique et au rayon réel pour l'arc compris entre le point d'intersection de la coulisse avec l'horizontale qui répond au point mort, et celui de la coulisse qui répond au cran de détente considéré. M. Phillips ajoute qu'il définit système des barres droites celui dans lequel, la manivelle étant en arrière de l'axe moteur, les barres d'excentriques ne se rencontrent qu'en arrière de cet axe; et système de barres croisées, celui dans lequel, la manivelle étant dans la même position, les barres d'excentriques se rencontrent en avant de cet axe.

MARCHE DU TIROIR COMPARÉE A CELLE DU PISTON POUR CHAQUE CRAN DE DÉTENTE.

M. Phillips établit les deux formules suivantes, qui font connaître à chaque instant l'inclinaison de la coulisse avec la verticale. Ces équations sont :

$$\alpha = \frac{r}{c} \sin\theta \sin\omega$$

pour le système des barres droites, et

$$\alpha = -\frac{r}{c} \sin\theta \sin\omega$$

pour celui des barres croisées.

Dans ces équations, r est le rayon d'excentricité ; c, la demi-longueur de la coulisse ; ω, l'angle de révolution de la manivelle, à partir de l'instant où le piston était à fond de course vers l'arrière ; θ, le complément de l'angle de calage, et α, l'angle que fait la corde de la coulisse avec la verticale au moment considéré. M. Phillips démontre par ces formules que, dans tous les cas, 1° l'angle α est nul quand $\omega = o$ et quand $\omega = 180°$; 2° que cet angle atteint son maximum quand $\omega = 90°$; 3° que pour 2 valeurs de ω différentes de 180°, α a des valeurs égales et de signes contraires ; 4° que l'angle α redevient le même pour deux valeurs de ω également distantes de 90° ; 5° qu'il varie, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnellement au rayon d'excentricité et au sinus du complément θ de l'angle de calage et en raison inverse de la longueur de la coulisse ; 6° enfin que l'angle α est indépendant de la longueur des barres d'excentriques pourvu que cette longueur soit assez grande.

Il donne ensuite 4 formules au moyen desquelles on peut résoudre toutes les questions relatives à la marche du tiroir comparée à celle du piston.

Ces formules sont :

Barres droites.

$$\xi = r\cos(\theta - \omega) + \frac{ur}{d}\sin(\theta - \omega) - \frac{ur}{c}\sin\theta\sin\omega$$

(marche en avant).

$$\xi = r\cos(\theta + \omega) + \frac{ur}{d}\sin(\theta + \omega) + \frac{ur}{c}\sin\theta\sin\omega$$

(marche en arrière).

Barres croisées.

$$\xi = r\cos(\theta - \omega) - \frac{ur}{d}\sin(\theta - \omega) - \frac{ur}{c}\sin\theta\sin\omega$$

(marche en avant).

$$\xi = r\cos(\theta + \omega) - \frac{ur}{d}\sin(\theta + \omega) + \frac{ur}{c}\sin\theta\sin\omega$$

(marche en arrière).

Dans ces formules, u représente la distance du coulisseau au point d'attache de la barre d'excentrique la plus voisine, quantité qui dépend du cran auquel on marche et qui est donnée, et ξ est le chemin parcouru par le coulisseau depuis l'instant où le tiroir est au milieu de sa course.

Ces formules font connaître à chaque instant la position du tiroir pour une position quelconque de la manivelle. Réciproquement, si l'on voulait avoir l'angle de la manivelle pour une position quelconque et donnée du tiroir, on devrait se servir de la formule suivante :

$$tg\omega = \frac{1}{\xi^2 - B^2}\left(AB \pm \xi\sqrt{A^2 + B^2 - \xi^2}\right),$$

dans laquelle A et B sont les coefficients de cos ω et de sin ω, quand on a mis celle des quatre formules précédentes qui se rapporte au cas en question sous la forme

$$\xi = A\cos\omega + B\sin\omega,$$

forme qu'on obtient très facilement en remplaçant

$\sin(\theta + \omega)$ par $\sin\theta\cos\omega + \cos\theta\sin\omega$;
$\sin(\theta - \omega)$ par $\sin\theta\cos\omega - \cos\theta\sin\omega$:
$\cos(\theta + \omega)$ par $\cos\theta\cos\omega - \sin\theta\sin\omega$;
et $\cos(\theta - \omega)$ par $\cos\theta\cos\omega + \sin\theta\sin\omega$.

A l'aide de ces formules, il fait voir que, dans tous les cas, et quel que soit le cran, la coulisse oscille de part et d'autre d'un point constant dont la distance d, au centre de rotation de l'essieu moteur, est la moyenne entre les distances du point le plus éloigné et du point le plus rapproché de ce même centre, où la coulisse vient rencontrer la parallèle à l'axe du piston qui passe par le centre de l'essieu moteur pendant les oscillations produites par la marche, en supposant que le cran de détente ne varie pas. De plus, 2 positions de la coulisse, à égales distances de ce point, répondent toujours à 2 angles de la manivelle différant entre eux de 180°. Le tiroir oscille donc de part et d'autre d'une verticale passant par le milieu de sa course, et ses positions symétriques, de part et d'autre de cette verticale, répondent à des angles de rotation différant entre eux de 180°. Si donc on place les lumières d'admission de vapeur symétriquement par rapport à cette même verticale, il en résulte que les quatre formules dont il vient d'être parlé représentent le chemin parcouru par le tiroir à partir de sa position moyenne, ce chemin étant compté positivement quand le tiroir marche de l'arrière vers l'avant de la machine, et négativement quand il marche en sens contraire. De plus, quand le tiroir passe d'abord par une position donnée, puis y revient, la somme des angles de rotation qui répondent à une même position du tiroir est constante et double de l'angle de rotation qui a lieu quand le tiroir arrive à l'extrémité de sa course. Par conséquent, l'angle de rotation qui a lieu depuis une position du tiroir jusqu'à l'instant où il commence à rétrograder est toujours égal à l'angle de rotation depuis le moment où il rétrograde jusqu'à celui où il repasse par sa première position.

M. Phillips tire ensuite les conséquences suivantes de ces 4 équations :

1° La durée de l'admission, celle de la détente, l'échappement et la com-

pression sont très sensiblement, toutes choses égales d'
dantes du rayon d'excentricité. Il influe seulement sur les
sur les ouvertures de lumière.

2° Toutes choses égales d'ailleurs, on a des admissions
le système des barres d'excentrique croisées, qu'avec celu
tes, et la différence est d'autant plus grande, que l'on o
détente, résultat qui est confirmé par l'expérience.

3° L'avance à l'échappement est plus petite avec les barr
les barres droites.

4° Il y a moins de compression avec les barres croisées
droites.

5° Les barres étant droites ou croisées, plus l'angle d
plus les admissions sont longues.

6° Plus le tiroir est mené par un point voisin du milie
moins les admissions sont longues, ce qui est la propriété
la coulisse.

7° L'avance à l'échappement et la compression augme
mesure qu'on détend davantage.

8° La course du tiroir diminue, dans tous les cas, à me
davantage; et toutes choses égales d'ailleurs, on a des co
avec les barres croisées qu'avec les barres droites.

9° La coulisse s'incline d'autant plus que sa longueur e
que le rayon d'excentricité est plus grand, et que l'angle
petit.

M. Phillips fait voir enfin qu'au moyen de ces formule
épure, étant donnés les divers éléments d'une distributi
rayon d'excentricité, l'angle de calage, la longueur de la co
chaque cran) de la partie de sa corde comprise entre son ex
contre avec la parallèle à la course du piston passant par le
moteur, le recouvrement extérieur et intérieur de chaque
cilement déterminer de quelle manière s'opère la distributi
rents crans de détente, c'est-à-dire qu'on peut avoir l'avan
roir, sa course, l'admission de la vapeur, l'ouverture m
mière d'admission, la durée de la détente, celle de l'éch
de la compression.

2° Etant données les conditions auxquelles doit satisfair
c'est-à-dire l'admission pour divers crans, les ouvertures
vance à l'échappement, etc., on peut en déterminer les élé
ce que doivent être le rayon d'excentricité, l'angle de calag
qu'il soit le même pour les deux excentriques, le rec
rieur, etc.

M. Phillips a fait voir que le cas où le calage des deux
différent se ramène très simplement à celui du calage sym
pelant θ_0 et θ, les angles répondant à l'excentrique de la m
à celui de la marche en arrière, appelant σ la demi-somme

$$\frac{\theta_0+\theta_1}{2},$$ et ε la demi-différence $$\frac{\theta_0-\theta_1}{2}$$

il suffit de remplacer, dans toutes les formules qui se rapportent au calage symétrique, θ par σ et ω par $\omega+\varepsilon$. Ainsi, on aurait

$$\xi = r\cos(\sigma-\omega-\varepsilon)+\frac{ur}{d}\sin(\sigma-\omega-\varepsilon)-\frac{ur}{c}\sin\sigma\sin(\omega+\varepsilon)$$

pour la marche en avant, avec les barres droites. Les autres formules se transformant de même, on aurait :

$$tg(\omega+\varepsilon)=\frac{1}{\xi^2-B^2}\left(AB\pm\xi\sqrt{A^2+B^2-\xi^2}\right).$$

A et B étant ici les coefficients de $\cos(\omega+\varepsilon)$ et de $\sin(\omega+\varepsilon)$, quand on a mis la valeur de ξ sous la forme $\xi = A\cos(\omega+\varepsilon)+B\sin.(\omega+\varepsilon)$.

Avec le système de calages différents on peut résoudre exactement les mêmes questions qu'avec le calage symétrique. M. Phillips fait voir que ce système offre, sur celui du calage symétrique, l'avantage de pouvoir pousser la détente plus loin, tout en conservant la même admission, à pleine admission.

Pour donner une idée du degré d'exactitude de la théorie précédente et du degré de confiance qu'on peut lui accorder, M. Phillips cite l'exemple suivant ; c'est une des applications qu'il en a faites.

MACHINES MIXTES DU CHEMIN DE FER DE L'OUEST.

Données.

$r = 0^m,058$, $\quad d = 1^m,396$,
$\theta = 60°$, $\quad 2c = 0^m,292$.

Système des barres croisées.

Nos des cranz de détente marche en avant.	Courses du tiroir données par la formule	Courses du tiroir données par l'expérience.
0	$0^m,048$	$0^m,048$
1	$0^m,054$	$0^m,054$
2	$0^m,06333$	$0^m,064$
3	$0^m,0749$	$0^m,073$ fort.
4	$0^m,088$	$0^m,089$
5	$0^m,1017$	$0^m,102$
6	$0^m,116$	$0^m,116$

M. LE PRÉSIDENT exprime à M. Phillips ses remercîments pour la communication qu'il a bien voulu faire.

UN MEMBRE fait observer qu'en étudiant avec des gabarits en bois et en grandeur d'exécution la distribution des machines du chemin de fer d'Orléans, on est arrivé à toutes les conclusions générales signalées par M. Phillips dans son mémoire, et notamment pour ce qui est de l'influence de la disposition des barres droites ou des barres croisées sur la détente plus ou moins prolongée.

UN AUTRE MEMBRE fait remarquer que la pratique est tout à fait d'accord avec la théorie qui vient d'être émise quant à ce qui regarde le rayon de fabrication des coulisses de Stephenson, qui doit toujours être plus grand que la distance de la coulisse (supposée placée au point mort) au centre de l'excentrique; que, de même, quel que soit le cran de détente, le mouvement angulaire d'admission est constant, la section seule d'admission est modifiée par le rayon d'excentricité. On est arrivé aux mêmes résultats avec les machines du chemin de fer d'Orléans.

Il demande ensuite à l'auteur du mémoire s'il a essayé de faire au chemin de fer de l'Ouest l'application de ses formules. M. Phillips répond que sur les machines, telles qu'elles sont construites, l'application des formules l'avait conduit à augmenter, dans une proportion très notable, l'excentricité et par suite la longueur des tiroirs.

Il ajoute que, sous le rapport de la distribution, il attacherait une très grande importance, au point de vue des ouvertures des lumières, à ce que les rayons d'excentricité fussent plus grands qu'on ne les fait habituellement; qu'il ne craindrait pas de les porter jusqu'au double. Seulement, c'est aux ingénieurs et aux constructeurs à examiner jusqu'à quelle limite certaines considérations pratiques, comme la pression des tiroirs, la difficulté de manœuvrer le levier du mécanisme, l'usure résultant d'un trop grand frottement, etc., provenant d'une grande longueur et d'une grande course du tiroir, permettent d'augmenter les rayons d'excentricité. M. Phillips ajoute qu'il croit que ces difficultés pratiques ne sont pas insurmontables, et il pense qu'il y aurait un tel avantage à avoir de grandes ouvertures de lumières, qu'il serait d'un grand intérêt de réaliser ce perfectionnement.

Après ces observations, M. le président invite M. Le Chatelier à prendre la parole pour une communication sur la distribution de la vapeur dans les cylindres, et sur une disposition qui permet d'augmenter le passage dans les lumières pendant l'admission de la vapeur.

M. LE CHATELIER fait remarquer que la détente produite par l'emploi de la coulisse Stephenson, ainsi que toute détente par recouvrement à un seul tiroir, a l'inconvénient de ne permettre qu'une faible ouverture aux lumières d'admission de vapeur; il en résulte une perte considérable de pression dans le passage de la vapeur de la chaudière aux cylindres, perte qui va quelquefois jusqu'à moitié de la pression initiale; c'est donc une très mauvaise condition pour l'emploi de la vapeur.

Aux inconvénients inhérents à ce système viennent se joindre ceux de la haute pression à laquelle on marche avec des locomotives.

En Angleterre, on a cherché à augmenter l'ouverture des lumières pendant l'admission à l'aide d'une disposition assez ingénieuse et qui prend beaucoup d'extension.

Le tiroir conserve ses dimensions et formes primitives; seulement, on monte pleins les bords longitudinaux extérieurs jusqu'à la partie supérieure du tiroir, qui forme, dès lors, une surface plane dans toute sa longueur.

Dans chacun de ces deux bords ainsi augmentés, et extérieurement à la coquille, on ménage deux rainures ou mieux deux lumières qui correspondent avec celles du cylindre, et qui, dans les périodes ordinaires d'admission, mettent en communication la botte à vapeur avec l'intérieur du cylin-

dre. Cette communication est ouverte ou fermée au moyen d'une plaque en fonte dressée et percée de deux lumières de mêmes dimensions que celles du tiroir avec lesquelles elles correspondent alternativement pendant chaque période d'admission.

Cette plaque est entraînée par le mouvement du tiroir; mais sa course est limitée par des taquets placés dans la boîte à vapeur, de telle sorte que le tiroir, marchant dans un sens et parcourant sa course, une des lumières qu'il porte vient se placer sous celle correspondante de la plaque, et donne, par cet endroit, accès à la vapeur dans le cylindre. Rien n'étant changé aux dimensions du tiroir pendant la période d'admission, la vapeur s'introduisant, comme d'ordinaire, dans le cylindre, la section d'admission est augmentée de toute celle de la nouvelle ouverture.

Ces lumières sont évidemment combinées de façon à ce que jamais, dans la période d'échappement, la boîte à tiroir ne soit en communication avec celles du cylindre. Cette plaque augmente nécessairement la longueur du tiroir et augmente nécessairement aussi le frottement; mais il faut remarquer que le mouvement de cette plaque est de 2 cent. 1/2 environ; que, de plus, on l'a percée d'un trou en son milieu, de façon à l'équilibrer autant que possible, en mettant la vapeur sur ses deux faces. A cet effet, le tiroir est creusé sur une portion de sa face supérieure, ce qui permet à la vapeur de s'introduire.

L'application de la plaque sur le tiroir se fait au moyen de ressorts, afin que le contact ait toujours lieu, quelle que soit l'usure de celui-ci.

Cette disposition reçoit depuis quelque temps, en Angleterre, beaucoup d'applications.

M. POLONCEAU dépose deux échantillons de rondelles en caoutchouc vulcanisé, préparé par la méthode américaine, et qu'il a laissées plongées pendant six semaines dans une chaudière à vapeur, en les suspendant par un fil de fer, de façon à ce qu'elles ne touchent pas le fond. Ces rondelles ne présentent d'autre altération que celle de la résistance du caoutchouc qui a conservé son élasticité, mais se déchire plus facilement. M. Polonceau ajoute qu'on peut avec avantage les employer à faire les joints des brides de cylindres et de tuyaux.

UN MEMBRE fait observer qu'on les a déjà employées avec succès en Amérique pour les joints des trous d'homme.

UN AUTRE MEMBRE dit que, pour résister à une température élevée de la vapeur, il faut que le caoutchouc soit bien préparé. Au chemin de fer de Saint-Germain, où l'on a essayé de l'employer comme garniture de tige de piston de joints et de conduites des machines atmosphériques, le caoutchouc a été décomposé, il s'est fondu et a coulé. Cela a été attribué à l'influence du contact de l'huile.

M. POLONCEAU répond que, depuis trois semaines, il a des garnitures de joints ainsi faites, aux niveaux d'eau de ses chaudières, et que, jusqu'ici, elles n'ont pas bougé; mais alors elles ne sont pas en contact direct avec la vapeur seule, et puis il n'y a pas de friction comme dans le cas des machines de Saint-Germain, où, en outre de la chaleur, il y avait le frottement de la tige.

SÉANCE DU 5 MARS 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

M. LE CHATELIER, ingénieur en chef des mines, a la parole pour continuer sa communication sur quelques règles pratiques à suivre dans la construction des machines locomotives.

Il relève d'abord une erreur qui a été introduite dans le compte-rendu de la dernière séance sur la description qu'il a faite du tiroir additionnel pour augmenter dans les machines locomotives la section des lumières.

Ce tiroir est fixé et n'est pas entraîné par le mouvement du tiroir principal, ainsi qu'on l'a dit et ainsi que cela a été fait déjà dans plusieurs systèmes de tiroirs pour produire la détente.

Il dit ensuite qu'il s'est proposé de chercher s'il ne serait pas possible d'établir empiriquement quelques rapports entre les conditions de service des machines locomotives et les dimensions des éléments qui constituent leur puissance. Il a été amené à énoncer les règles suivantes, qui, bien entendu, n'ont rien d'absolu, et qui sont des moyennes dont on peut s'écarter plus ou moins, suivant les circonstances dans lesquelles on est placé; mais alors, si l'on s'en écarte, on sait pourquoi on le fait et quelle sera la conséquence de cette déviation de la règle, tandis que, jusqu'ici, c'est à peu près au hasard que les éléments principaux des machines ont été combinés.

1° Pour éviter de fatiguer le mécanisme par une trop grande vitesse d'oscillation des pistons, *le nombre de tours de roues motrices pour* 1 *mètre doit être compris entre* 2 1/2 *et* 3. Cette règle, formulée dans le *Guide du mécanicien*, paraît avoir été accueillie par un assentiment assez général, et il la maintient. On en déduit le diamètre D des roues motrices.

2° L'effort moyen que la vapeur doit développer sur les pistons est

$$T = p\frac{d^2 l}{D},$$

p étant la pression moyenne utile de la vapeur en kilogr. par centimètre carré, d le diamètre des pistons, l la course, D le diamètre des roues motrices. T est en même temps la somme de résistance de toute nature que le mouvement développe.

La valeur de T *sera déduite de la formule de Wyndham Harding* (*Guide du mécanicien*, pag. 547 et 549), dont l'expression est

$$T' = 2{,}72 + 0{,}094V + 0{,}00\,484\frac{NV^2}{P}.$$

T′ étant la résistance par tonne du poids du convoi en kilogrammes, V la vitesse en kilomètres à l'heure, N la surface de front du véhicule en mètres et P le poids du convoi en tonnes.

En faisant N=5, on a

$$T' = 2,72 + 0,094V + 0,0242\frac{V^2}{P}.$$

On calculera, au moyen de cette formule, la résistance sur niveau des véhicules qui composent le convoi, y compris la machine et le tender. On augmentera de 25 0/0 ou de 20 0/0 cette quantité, suivant qu'on s'occupera d'un convoi de voyageurs ou de marchandises, pour tenir compte des résistances additionnelles dues au travail de la vapeur et aux frottements du mécanisme; on y ajoutera la résistance due à la gravité sur le profil qu'on a considéré; le résultat, multiplié par le poids brut du convoi exprimé en tonnes, donnera la valeur de T.

3° *L'adhérence sera supposée égale à 1/6*, proportion qui paraît généralement admise; on calculera avec ce coefficient, connaissant la valeur de T, la charge à donner aux roues motrices, et *on en déduira, en limitant de 10 à 12 tonnes cette charge pour chaque essieu, le nombre de paires de roues qui doivent être accouplées.*

4° Dans la formule $T = p\frac{d^2l}{4}$, si l'on suppose que la chaudière soit timbrée à sept atmosphères, en tenant compte de la perte de pression dans les conduits de vapeur, et les diminutions de pression utile qui a lieu par suite de la détente, par suite de l'avance à l'échappement de la contre-pression pendant l'échappement et de la compression, on est conduit à admettre, pour la valeur de p, $4^{atm},5$, ou $4^{kil},64$ par centimètre carré. On suppose, bien entendu, que lorsque la machine effectue un travail maximum, elle travaille en pleine admission, et c'est sur ce cas que l'on règle les dimensions des pistons et de la chaudière, tandis que le diamètre des roues est réglé sur la vitesse habituelle que prend la machine sur niveau ou à la descente.

Ceci posé, on *déduira de la formule* $T = p\frac{d^2l}{D}$ *la valeur de* d^2l, et si l'on s'est donné *d à priori*, la valeur de l, *ou vice versa*.

5° *Le rapport de la surface de chauffe S du foyer à la surface de chauffe* S′ *des tubes doit être* $\frac{S}{S'} = \frac{1}{10}$. Cette règle est déduite de la comparaison de 15 machines anglaises et de 15 machines françaises, et conforme à l'opinion déjà exprimée par plusieurs ingénieurs.

Les 15 machines anglaises ont donné le rapport 0,96 : 10, qui ne diffère pas sensiblement de 1 : 10; les 15 machines françaises donnent le rapport 0,83 : 10, qui est notoirement trop faible, et qui résulte de ce que nos foyers, placés généralement en porte-à-faux, ont une dimension trop restreinte.

6° *Le rapport de la surface de chauffe totale, du volume engendré par les pistons*, dont la consommation de vapeur dépend, *doit être* $\frac{S+S'}{dl} = 1$,

S et S′ étant exprimés en mètres carrés, et d et l en décimètres.

M. LE CHATELIER a trouvé, pour 18 machines anglaises, $\frac{S+S'}{d^2 l}=1{,}15$, et pour 18 machines françaises $\frac{S+S'}{d^2 l}=0{,}93$. Ce dernier rapport est encore plus faible que ne l'indique le chiffre qui précède, car les tubes ont une proportion beaucoup trop grande dans nos machines ; on est autorisé à prendre $\frac{S+S'}{d^2 l}=1$, qui représente la moyenne, si l'on remarque que l'ensemble de nos machines manque de surface de chauffe, et que les Anglais, qui ne font pas usage du tuyau d'échappement variable, en ont en général un excès dans leurs machines.

Au moyen de ces données, il a calculé les dimensions de trois types de machines placées dans des conditions de service différentes.

1er Exemple. — *Trains express de huit wagons, pesant chacun* 7 *tonnes* 1/2, *marchant habituellement à la vitesse de* 80 *kilom. à l'heure, sur des rampes de* 5 *millimètres par mètre ; poids de la machine* 26 *tonnes, et du tender* 11 *tonnes.*

2e Exemple : *Train-omnibus marchant avec* 16 *wagons de* 7 *tonnes et demie, à une vitesse qui n'excède pas* 45 *kilomètres à l'heure, sur des rampes de* 5 *millimètres et* 55 *kilomètres sur niveau ou à la descente ; poids de la machine* 24 *tonnes, et du tender* 11 *tonnes.*

3e Exemple : *Train de marchandises marchant avec* 40 *wagons de* 9 *tonnes chacun, à une vitesse de* 30 *kilomètres à l'heure à la montée des rampes de* 5 *millimètres, et à la vitesse de* 40 *kilomètres à l'heure sur niveau ou à la descente ; poids de la machine* 28 *tonnes, et du tender* 12 *tonnes.*

Les résultats du calcul sont compris dans le tableau suivant :

	1er exemple.	2e exemple.	3e exemple.
Poids brut du convoi.	97 tonnes	155 tonnes	400 tonnes
Résistance totale.	1920^{kg},64	2377^{kg}	4688^{kg}
Charges des roues motrices. .	11^{t},50	14^{t},86	28^{t},13
Nombre des roues accouplées.	»	4	6
Diamètre des roues motrices. .	2^{m},50	1^{m},78	1^{m},30
Diamètre des cylindres. . . .	0^{m},42	0^{m},40	0^{m},46
Course des pistons	0^{m},59	0^{m},57	0^{m},62
Surface de chauffe du foyer . .	9^{mq},41	8^{mq},29	11^{mq},94
Surface de chauffe des tubes. .	94^{mq},07	82^{mq},91	119^{mq},40
Surface totale.	103^{mq},48	91^{mq},20	131^{mq},34

Si l'on compare ces résultats aux dimensions des machines qui correspondent le mieux à ces trois exemples, c'est-à-dire à la machine Crampton du chemin de fer du Nord, à la machine mixte de M. E. Gouin du chemin de fer de Lyon, et à la nouvelle machine à marchandises du chemin de fer du Nord, on verra que les différences, qui ne sont pas d'ailleurs très considé-

rables, correspondent à des améliorations dans la construction de ces machines.

Ainsi que M. Le Châtelier l'a fait remarquer, ces règles n'ont rien d'absolu et de définitif, car un examen plus attentif de la question pourra modifier la valeur des rapports établis, ou faire établir des rapports un peu différents pour les trois sortes de machines, à voyageurs, mixtes et à marchandises; on pourra s'en écarter suivant les circonstances, mais sans cesser pour cela d'en tenir compte, afin même d'apprécier l'importance de ces écarts et les conséquences qui peuvent en résulter. C'est ce qu'il a fait jusqu'à un certain point pour les machines des trains express, qui, si elles montent des rampes de 5 millimètres à 80 kilomètres à l'heure, marcheront souvent sur niveau à 100 kilomètres. Il faut alors sacrifier la conservation du mécanisme à la facilité de construction des roues. De même pour les machines à marchandises très puissantes, si l'on trouve quelque difficulté à leur donner toute la surface de chauffe qu'exigeraient les conditions d'une vaporisation facile, on réduira cette surface de chauffe, mais on saura en même temps qu'il faut compter davantage sur l'emploi d'un échappement à petite section, et s'attendre aux inconvénients qui en résultent, ou ne pas s'étonner si les machines ne peuvent pas gravir les rampes avec la vitesse correspondant aux dimensions de leurs cylindres, que la vapeur ne remplira plus avec une aussi grande facilité.

UN MEMBRE fait observer qu'on aurait dû prendre deux coefficients pour indiquer le rapport qui doit exister entre la surface de chauffe totale et la dépense des cylindres; que ce coefficient ne doit pas être le même pour les machines à voyageurs que pour des machines à marchandises.

L'AUTEUR répond que c'est aussi son avis; que la méthode qu'il a suivie n'a pas un caractère absolu, mais que cependant il ne pense pas que les coefficients pour les machines à marchandises, par exemple, doivent descendre au chiffre que donnent les nouvelles machines à marchandises du Nord. Aussi il pense que, dans le cas de grand travail, ces machines manqueront un peu de vapeur, mais que, dans ce cas extrême, il suffira de marcher à moindre vitesse et à plus grande détente.

UN MEMBRE approuve cette méthode de recherche des rapports, et surtout des rapports simples; mais il pense qu'on peut étendre les limites dans lesquelles M. Le Châtelier les a renfermés; ainsi, il trouve qu'une vitesse de 80 kilomètres à l'heure, qui n'est pas une vitesse exagérée, est trop faible pour un diamètre de roue de $2^m,36$, auquel conduit l'application de ses formules.

M. LE CHATELIER fait observer que la règle qu'il propose, n'étant qu'un guide, servira à s'assurer, dans la pratique, par où on manque, si on ne peut pas remplir par des considérations pratiques toutes les conditions qu'elle trace.

M. LE PRÉSIDENT invite un membre à expliquer ce qui a fait limiter à $2^m,30$ le diamètre des roues pour les nouvelles machines à grande vitesse du chemin de Strasbourg.

CE MEMBRE répond que, par suite de la faible longueur du moyeu qu'on est obligé de donner dans ce système aux roues motrices, on a craint qu'elles ne se déversassent.

Pour des roues de 3 mètres, par exemple, il faudrait donner 230 millimètres au moins de portée de calage, et on ne peut guère dépasser 175 millimètres; au delà, on augmente l'écartement d'axe en axe des cylindres, l'aplomb des fusées des roues de supports par rapport à ces roues.

Enfin, on place ces machines dans de mauvaises conditions de stabilité. Il ajoute que l'augmentation du diamètre augmente le nombre des rayons, leur poids, et inutilement le poids de ces parties d'une manière considérable.

M. LE CHATELIER répond que le Great-Western emploie depuis longtemps des roues de $2^m,40$ de diamètre, mais qu'il est vrai d'ajouter que, sous le rapport de la stabilité, ces machines sont dans de meilleures conditions que les machines Crampton, parce qu'elles ont des fusées extérieures et intérieures, qu'elles sont en quelque sorte emboîtées : aussi ne voit-il pas d'inconvénient général à l'application des règles qu'il a développées dans son mémoire.

UN MEMBRE fait observer qu'au chemin du Nord on ne remarque pas que le grand diamètre des roues des machines Crampton, qui est de $2^m,10$, soit pour elles une cause de déversement; la plus grande cause d'usure et de réparation de ces roues est dans la difficulté d'avoir de bons bandages bien soudés.

UN AUTRE MEMBRE ajoute que, du reste, les limites pour les dimensions sont plus dans les systèmes de machines que dans les principes théoriques et déduits de l'expérience.

M. LE PRÉSIDENT donne ensuite communication d'un travail présenté par M. Jules Poirée, ingénieur des ponts et chaussées, *relatif à l'évaluation de la puissance et des consommations produites par les machines locomotives employées au remorquage des trains de voyageurs entre Paris et Montereau.*

Les expériences ont été faites sur 6 trains directs et 4 trains omnibus (ou à stations), dans les mois de novembre et décembre 1851.

On a déterminé le travail absorbé par les wagons à l'aide d'un dynamomètre Morin, placé entre le tender et les voitures. Le travail total développé par la machine pour se mouvoir elle-même, et remorquer son tender et le train, a été déterminé approximativement, en supposant, avec Gooch et M. de Pambour, que le travail absorbé par la machine et le tender est 0,15 de celui absorbé par les wagons, auquel chiffre on ajoute 500 kilog., qui est la résistance de traction sur niveau de la machine et du tender.

Le dynamomètre a donné la courbe totale du travail, ou le nombre de kilogrammètres qui, divisé par le temps de marche, a donné le travail par seconde en kilogrammètres et en chevaux-vapeur, en divisant ce dernier chiffre par 75.

On a pris soin de déduire du temps de marche celui pendant lequel le régulateur a été fermé, ainsi que le temps d'arrêt aux stations.

La dépense en coke et en eau s'est faite soigneusement par pesée et métrage.

En résumé, la moyenne prise sur les 10 expériences a donné, sur 6 trains directs, une puissance totale de 294 chevaux pour une charge de voi-

tures de 107 tonnes, et une puissance de 161 chevaux pour les voitures seules marchant à la vitesse moyenne de 45 kilom.

Sur les 4 trains omnibus on a trouvé une puissance totale de 248 chevaux pour remorquer une charge de voitures de 88 tonnes, correspondante à une puissance de 184 chevaux pour les voitures marchant à la vitesse moyenne de $38^k,5$.

Enfin, la consommation moyenne par cheval et par heure, pour les 10 trains, a été en coke de $2^k,05$, en eau de $14^k,16$. Ainsi, pour la puissance, les machines locomotives seraient comparables, dans certaines limites, aux machines de bateaux, et, pour la consommation en coke, elles seraient dans les conditions des meilleures machines fixes.

UN MEMBRE fait observer que, pour les machines fixes, le chiffre habituel de la consommation en combustible s'applique au travail effectif de la vapeur sur l'arbre du volant ou de la manivelle, et non au travail total produit par la vapeur; que si on comptait de cette façon la consommation du combustible dans les machines fixes, la moyenne ordinaire s'abaisserait, et s'éloignerait par conséquent du chiffre indiqué par M. Poirée pour la consommation totale développée par les locomotives.

Ainsi le coefficient de réduction sur la puissance totale d'une machine fixe, mesurée sur l'arbre moteur, est 0,80 du travail développé par la vapeur à la pression sur les pistons; les chiffres de consommation des machines fixes, pour être comparés à ceux des locomotives, devraient être augmentés de 0.20.

Il fait ensuite remarquer combien la dépense d'eau de ces machines a été faible; qu'il a dû y avoir bien peu d'eau entraînée par la vapeur; et, en effet, les machines qui ont servi aux expériences sont des machines mixtes à grand réservoir de vapeur, sortant des ateliers de M. E. Gouin.

Pour ce qui est du coefficient de réduction à appliquer au travail développé par les machines fixes, ce membre estime qu'il doit être plus considérable pour les machines fixes que pour les machines locomotives, où les dimensions sont beaucoup plus faibles que dans les premières.

M. LE CHATELIER partage complétement cet avis, et ajoute que les constructeurs ont exagéré les dimensions des cylindres des machines fixes par rapport à leur puissance; qu'il y a, à cet égard, de nouvelles études à faire, en se basant sur ce qui se passe dans les machines locomotives.

On a tellement exagéré le diamètre des cylindres, dit un membre, que dans certaines machines sans condensation, on a appliqué des reniflards, parce que le diamètre des cylindres et la détente avaient été exagérés.

UN AUTRE MEMBRE appuie sur ces considérations, et conclut en disant que le rapprochement des machines fixes et des machines locomotives doit conduire à l'emploi des machines fixes à grande vitesse.

En résumé, il paraît ressortir du travail de M. Poirée que les locomotives peuvent être assimilées, comme utilisation de puissance et consommation de combustible, aux machines fixes à haute pression et sans condensation.

SÉANCE DU 19 MARS 1852.

Présidence de M. É. FLACHAT.

M. LE PRÉSIDENT donne communication d'une lettre qui lui a été adressée de Londres par M. Mayer, membre de la Société, au sujet de la construction de bateaux à vapeur destinés à transporter à Londres le charbon du littoral de l'est de l'Angleterre.

Ces bateaux seront en fer, à propulseur héliçoïdal, au lieu de roues à palettes. Tout l'appareil mécanique est placé à l'extrémité du bateau, de manière à laisser tout l'avant disponible pour le charbon. Dans cette dernière partie, des capacités sont réservées pour les réservoirs de l'eau qui servira de lest. Une machine à vapeur spéciale placée sur le pont élèvera les charbons, en commençant par ceux qui sont au fond du navire et en travaillant à la manière des puits de mines. De cette façon, les mouvements à bras dans l'intérieur du navire seront facilités. Indépendamment du charbon nécessaire pour le service de la machine, le bateau portera 600 tonnes, mais il est calculé pour en porter 800. De plus, le pont sera très solide et pourra porter deux pièces d'artillerie d'un gros calibre. Enfin, l'on fait valoir qu'en cas de nécessité il pourrait recevoir un équipage de 200 à 250 marins. Le tirant d'eau sera de 3m.50.

On construit dans ce moment deux bateaux pour essai, mais on a l'intention d'en construire 500.

Il n'y aura ni beaupré ni mâts proprement dits, mais seulement deux mâts pour *lug sails*, ou voiles analogues à celles que l'on emploie dans les barques.

Voici le devis d'un bateau et l'estimation des produits et dépenses d'exploitation.

DEVIS.

Environ 200 tonnes de fer à 200 fr., livraison comprise. .	fr. 40,000
Main-d'œuvre pour 200 kil. de fer à 200 fr., livraison comprise.	40,000
Travaux de charpente et de menuiserie.	7,500
Ancres, câbles et approvisionnements.	12,500
Prix du bateau à la mer.	100,000
Machine de 80 chevaux complète, garantie pour ne pas consommer au-delà de 8 tonnes par 24 heures.	50,000
	150,000

Dépenses de navigation de Hartlepool à Londres et retour, en supposant que le double voyage durera 14 jours :

Salaire au premier pilote avec nourriture. .	50 fr.	»	par voyage.
Second pilote.	37	50	
Mécanicien.	50	»»	
Chauffeur.	37	50	
8 hommes d'équipage à 2 fr. 50 c. . . .	250	»»	
Assurance sur 15,000 fr.	350	»»	
Charbon pour la machine 40 tonnes pouvant durer 5 jours à 6 fr. 85 c. par tonne. . . .	275	»»	
Droits de docks.	112	50	
Manutention à Hartlepool.	250	»»	
Huile, etc. pour les machines.	50	»»	
Imprévu et menus frais.	125	»»	
	1,587	50	

PRODUIT :

Fret de 600 tonnes de charbon à 5 fr. par tonne.	3,000	»»	
Dépenses de navigation à déduire. . . .	1,590	»»	
Bénéfice. . . .	1,410 fr.	»»	par voyage.

Bénéfice par an (24 voyages) 33,800 fr., soit 14 0/0.

On estime que le nombre de voyages sera, en général, de 30 au lieu de 24. Cette affaire est faite par les propriétaires des houillères de Stockton, Hartlepool, Seakam, Sunderland, Newcastle et Blith, qui veulent lutter contre le chemin de fer.

On remarquera qu'ils comptent faire payer 5 fr. par tonne. Le prix moyen de transport en 1850 par des navires ordinaires jaugeant environ 200 à 250 tonnes, et faisant douze voyages par an, a été de 6 fr. 85 c.

Après cette communication, M. le président donne la parole à M. Lorentz pour rendre compte de la discussion qui a eu lieu, à la Société des Ingénieurs civils de Londres, sur un mémoire de M. Adams, relatif à la construction et à l'entretien de la voie des chemins de fer en Europe, et sur les systèmes les plus convenables pour des contrées telles que l'Egypte et l'Inde.

M. ADAMS commence par une analyse des diverses conditions que, suivant lui, doit remplir une voie de chemin de fer. Ces conditions se résument ainsi :

Le sol qui supporte la voie doit être disposé pour un facile écoulement des eaux. La solidité de la voie doit être proportionnelle au poids des machines et à l'importance du trafic.

Les rails doivent être robustes, afin de résister aux efforts de flexion; durs, pour être à l'abri de l'usure par laminage; polis, pour donner lieu au moindre frottement possible, et inclinés, dans les courbes principalement, de manière à se prêter au mouvement et à la forme des roues; enfin, les joints doivent être tels que les rails ne forment, pour ainsi dire, qu'une barre continue, et qu'ils se prêtent cependant à la dilatation et à la contraction.

Le Mémoire énumère ensuite les divers modes de rails mis en pratique jusqu'à présent, depuis les bandes de fer plat ou saillant, employées dans les mines aux premiers temps des chemins de fer, jusqu'au rail symétrique à double champignon, dont l'usage est si général aujourd'hui.

Cette revue est suivie de l'examen des nouveaux systèmes de rails, y compris les rails qui font exclusion de tout support et que l'on peut appeler *rails-longrines*. Le plus connu, parmi ces derniers, est le rail en forme de *selle* de M. William-Henri Barlow. Suivant M. Adams, ce rail doit présenter quelque difficulté au bourrage; il doit être trop rigide, et conséquemment se laminer, s'user au contact des roues des trains; il doit se prêter difficilement à la dilatation et à la contraction, en raison de ce que le joint s'y fait au moyen d'une plaque de section à peu près semblable à celle du rail, plaque sur laquelle ce dernier est rivé; enfin, M. Adams objecte que la force du joint y dépend entièrement de celle des rivets.

M. ADAMS, à son tour, propose divers systèmes de *rails-longrines*: l'un d'eux affecte une section en forme de T; en dessus se trouve le rail proprement dit, et à la partie inférieure un appendice vertical qui contribue à maintenir le rail et qui se prête au bourrage.

Ensuite, M. Adams passe à l'examen des divers systèmes de supports de rails. Les motifs qui ont amené l'abandon des dés en pierre sont le défaut d'élasticité, et plus encore, la difficulté et la cherté que présente le bourrage, le relèvement et l'entretien, en raison de la grande profondeur à laquelle ces supports doivent être placés, des entailles qu'il faut pratiquer dans la pierre pour le logement des coussinets et du prompt relâchement des chevilles.

Après avoir traité à fond la question des traverses en bois et insisté sur la nécessité de les envelopper complètement de ballast, M. Adams les compare aux longrines en bois, et conclut que, dans les deux systèmes, le cube de bois est le même pour peu que les surfaces d'appui sur le sol soient égales; la dépense est aussi la même à qualité égale de bois. Le système des longrines donne aux rails une excellente assiette; il est commode pour le bourrage; mais dans ce système, le bois se détériore plus vite et les attaches des rails sont moins efficaces.

M. REYNOLDS, en vue d'augmenter la durée des longrines en bois, a imaginé de les faire reposer dans une sorte de gouttière en fonte, de section triangulaire, le sommet du triangle étant en dessous. Ce procédé n'a point été accueilli très favorablement; et, plus récemment, on a proposé un grand nombre de systèmes qui font exclusion complète du bois, et dont quelques uns ont été appliqués avec succès.

M. GREAVES, de Manchester, a inventé un support en fonte, en forme de cloche ou calotte sphérique : le bourrage s'y fait, par le dessus, à travers deux petits orifices. Ce système est, dit-on, sur le point d'être adopté pour le chemin d'Egypte.

Dans le système de M. Peter William Barlow, le rail est exactement enserré, sans aide de coins, entre les mâchoires ou joues de coussinets venus de fonte sur un long plateau de 1 mètre de longueur (1).

(1) Ces plateaux, qui portent deux ou trois coussinets, sont en deux parties, reliées par des boulons horizontaux. L'un de nos habiles fondeurs de coussinets, M. Hamoir,

Suivant M. Adams, ce système offre trop de rigidité; M. William Henri Barlow l'a amendé en faisant venir de fonte sur un plateau des coussinets où le rail est fixé par des coins en bois.

M. SAMUEL a proposé de placer le rail dans une sorte de support ou coussinet en bois comprimé, embrassé lui-même par un sabot ou auge en fonte, très long, quoique discontinu.

M. HOBY a modifié le système précédent en remplaçant l'auge par un coussinet de forme ordinaire, mais très allongé; le rail est serré à chacune des extrémités dudit coussinet par deux coins.

M. ADAMS, après avoir examiné ou proposé divers autres systèmes de supports, conclut que la fonte peut être d'un bon usage, mais sous condition d'être employée en grande masse et de former un support continu, à moins toutefois que les rails ne soient assez résistants pour se maintenir par eux-mêmes sans fléchissement.

Examinant ensuite la question des attaches, M. Adams attribue la défaveur qui s'est, pendant quelque temps, attachée aux chevilles en bois, à leur manque de force à l'origine; les chevillettes en fer qui leur ont été substituées n'ont pas tardé à se voir remplacées à leur tour par de fortes chevilles en bois. Dans quelques chemins, on fait usage de bois comprimé suivant la méthode de MM. Ransomme et May, qui, comme on sait, sont les auteurs d'une forme particulière de coussinets.

La dernière question à traiter, c'est l'intime connexion qu'il convient d'établir entre deux rails consécutifs, de manière à ce qu'ils ne forment, pour ainsi dire, qu'un seul rail; cette question est d'une importance d'autant plus grande que la plus forte partie, soit des frais d'entretien, soit des accidents, provient de l'imperfection du joint.

Sur le Blackwal-Railway, on avait, antérieurement à l'emploi des machines locomotives sur cette ligne, assemblé l'une dans l'autre les extrémités des deux rails consécutifs; cette méthode affaiblissait les rails et réduisait leur longueur.

Plus récemment, on a imaginé d'appliquer au joint de chaque côté de la tige des rails une plate-bande ou platine d'abord en fonte, ensuite en fer; plus tard, on a évidé les platines de manière qu'elles ne portassent plus que haut et bas contre les champignons. A l'origine, les extrémités des platines reposaient dans les deux coussinets intermédiaires voisins qui étaient rapprochés à cet effet; mais depuis on a imaginé de fixer les platines aux rails, au moyen de boulons dont le passage au travers des rails est d'un diamètre plus fort que nécessaire, de manière à permettre la dilatation; enfin, au lieu de laisser ce joint suspendu entre deux coussinets intermédiaires, on s'est avisé de le supporter par un coussinet spécial.

---

de Maubeuge, a modifié ce système en faisant le plateau d'une pièce, et en se bornant à mobiliser l'une des joues de chacun des coussinets : l'une des extrémités de cette joue mobile s'applique contre le rail et le maintient, l'autre s'arcboute contre la partie fixe du coussinet; enfin la joue mobile est maintenue par un boulon vertical qui travaille peu, et n'a point, comme ceux du système Peter Barlow, à subir d'efforts transversaux de rupture ou de torsion.

M. SAMUEL, pour diminuer le prix de cette dernière modification, a proposé, en 1849, de fondre des coussinets à une seule joue ; cette joue s'applique contre un des côtés des rails et forme platine au côté opposé des rails ; on *rapporte* une platine mobile.

En Égypte, la sécheresse brûlante de l'atmosphère est pernicieuse pour le bois ; le sol y est d'ailleurs tantôt à l'état de poussière, tantôt à celui de terre détrempée. Dans ces conditions, si l'on emploie des supports discontinus, il devient nécessaire de les fondre aussi parfaitement que possible.

Dans les basses régions de l'Inde, le bois est soumis à deux causes de destruction : les inondations de la saison pluvieuse et les ravages du thermite (fourmi blanche) ; il est vrai qu'en créosotant le bois, l'on peut échapper à cette dernière cause de destruction ; mais le bois ainsi préparé présente l'inconvénient de se consumer facilement, en temps de sécheresse, sous l'action soit du soleil, soit du coke incandescent.

Dans les deux contrées que l'on vient de mentionner, ainsi que dans les colonies australiennes, il est opportun, en l'absence d'une police suffisante, de repousser les systèmes de voies qui donneraient prise à la malveillance et aux vols. La voie y doit donc être composée du plus petit nombre possible d'éléments ; et ces éléments doivent, pour être assemblés, ne requérir que la plus faible somme possible de main d'œuvre, car elle y est chère. Toutes ces circonstances pesées, M. Adams est d'avis que, pour les contrées en question, où la température est très variable du jour à la nuit, le meilleur système, et, en fin de compte, le moins cher, est un *rail-longrine* tout en fer, simple dans ses dispositions et profondément enfoui dans le ballast.

Deux séances de la Société des Ingénieurs civils de Londres ont été consacrées à la discussion du mémoire de M. Adams.

Tous les membres qui ont pris la parole ont reconnu qu'il était extrêmement important de réduire les frais d'entretien qui résultent des dispositions actuellement usitées pour la voie des chemins de fer, et ils ont examiné les diverses modifications réalisées dans ce but.

Voici, parmi les nouveaux systèmes, ceux qui ont paru obtenir l'approbation la plus générale ;

Le long coussinet de M. Fowler ; les joints avec platine ou plates-bandes de MM. Adams et Richardson ; les coussinets à une seule joue formant platine, de M. Samuel ; les coussinets-plateaux en fonte de M. Peter William Barlow ; les rails creux, à large embase, et se servant à eux-mêmes de support, de M. William Henri Barlow.

Chacun de ces systèmes présente quelque avantage particulier ; mais on a paru admettre que, les forges étant actuellement pourvues d'une puissance motrice assez considérable pour laminer des rails pesants avec plus de facilité et moins de dépense qu'anciennement, le rail creux de M. Barlow était, de tous les systèmes, celui qui réunissait le plus grand nombre d'avantages combinés.

On a contesté la prétendue rigidité attribuée aux voies qui font exclusion des supports en bois ; on a établi que la destruction de la voie et la dépense de l'entretien étaient singulièrement réduites par la fixité des joints ; on a encore établi qu'il n'était point nécessaire de prendre des précautions contre les effets de dilatation et de contraction de grandes longueurs de rails rivés

entre eux et enfouis dans le sable, ces effets ne s'étant point fait sentir en pratique (1).

Dès l'année 1838, on a importé en Angleterre, venant d'Allemagne, des rails percés d'un trou à chaque extrémité; l'opinion générale de l'assemblée a paru être que ces trous étaient destinés, non pas à fixer des platines contre les tiges des rails, mais au passage de chevilles propres à retenir les rails au fond des coussinets de joint; depuis un petit nombre d'années toutefois, l'usage des joints avec platine s'est répandu avec plein succès en Allemagne.

La discussion a porté ensuite sur les divers *rails-longrines*, sur les supports creux, sur l'accouplement de la pierre et du bois, et autres systèmes proposés par M. Adams. Cette accumulation de projets de toutes natures a été censurée comme n'étant propre qu'à retarder l'adoption des améliorations dues à des ingénieurs pratiques.

En ce qui concerne les rails de systèmes plus ou moins complexes ou compliqués, on a objecté qu'ils étaient moins solides de leur nature, et d'un renouvellement plus coûteux que le rail Barlow, qui offre cet avantage qu'étant exfolié à sa surface, on peut le faire repasser au laminoir pour un prix inférieur à 50 fr. par tonne; quant aux autres modifications proposées par M. Adams, elles ont été jugées peu utiles. Avec l'expérience acquise, de bons matériaux, du soin dans leur pose et leur entretien, il n'est pas impossible d'obtenir une bonne voie sans sortir des systèmes actuellement usités, et, parmi ces systèmes, on a admis qu'un des meilleurs, si ce n'est le meilleur, c'est un fort *bridge-rail* (rail-Brunel), solidement attaché à une forte longrine en bois, celle-ci étant bien enveloppée de sable de carrière, et préservée de l'humidité par de bonnes dispositions pour l'écoulement des eaux.

Relativement aux pays étrangers, on a objecté au mémoire de M. Adams que, sous presque tous les climats tropicaux, il existait des essences de bois de nature à résister aux attaques du thermite. Il est probable toutefois que, dans ces contrées, l'emploi de rails creux à large base, quoique plus coûteux de premier établissement, serait en définitive le plus économique.

Sur la question des chemins à dés en pierre, on a avancé que plusieurs de ces lignes se comportaient bien et étaient peu coûteuses d'entretien, quoique le trafic y fût considérable; il est vrai que la vitesse n'y est que de 16 à 20 kilomètres par heure; par contre, les grandes vitesses amènent promptement la détérioration de ce genre de voies.

En ce qui concerne les coussinets-plateaux en fonte, établis sur le *South Eastern* (2), on a établi incidemment qu'ils ne présentaient pas plus de casse que les coussinets ordinaires, quoiqu'ils aient été placés sur une partie de la ligne chargée de trafic et pourvue d'un mauvais ballast; ce qui le prouve suffisamment, c'est l'offre de M. l'entrepreneur Taylor, d'entretenir et renouveler cette portion du chemin pendant 21 ans, à raison de 2,500 fr. par an.

(1) C'est M. Brunel qui s'est chargé de réfuter les objections produites par M. Adams contre le rail Barlow, en ce qui concerne la prétendue difficulté de bourrage. Il a affirmé, d'après une expérience de deux années, que ce rail se bourrait aussi promptement que les rails ordinaires.

(2) C'est le système ci-dessus mentionné par M. Peter Barlow.

Le choix à faire entre les divers systèmes dépend d'une infinité de circonstances locales. Ainsi, quand le fer est à bas prix et le bois cher ou peu durable, il peut être très avantageux d'adopter le système des coussinets-plateaux ou des rails se servant à eux-mêmes de support; il n'en serait plus de même dans les contrées où il y aurait obligation de tirer le fer de l'étranger et où le bois serait abondant et résistant; dans ces conditions, c'est le système des longrines, avec rails légers, qui serait préférable.

Au reste, la question de l'entretien comparé des voies de divers systèmes est, jusqu'à présent, presque insoluble; la qualité des matériaux, leur poids, la vitesse du train, le poids et le nombre des convois, les soins donnés à la construction et à l'entretien, toutes choses variables d'une ligne à l'autre, rendent réellement peu comparables les résultats que présentent les comptes-rendus des diverses exploitations, et peu sérieuses les conséquences qu'on en pourrait tirer.

UN MEMBRE ne pense pas que la voie à rail-Barlow soit plus économique de pose que la voie actuelle avec rails, traverses et coussinets.

UN AUTRE MEMBRE dit que M. Le Châtelier, dans une application qu'il en a faite, l'a trouvée plus élevée; mais que, quant à lui, il est arrivé à ce résultat qu'en France, pour que la voie Barlow ne coûtât pas plus que la voie ordinaire, il faudrait que ces rails ne coûtassent pas plus de 320 fr. la tonne.

Il ajoute que les rails actuels ne s'usent pour ainsi dire pas, mais qu'ils se détruisent par les effets de l'instabilité de la voie, par suite du relâchement dans les assemblages et de la mobilité de tous les éléments.

Le rail-Barlow a cet avantage que, pour une longueur de voie de 6 mètres, en tenant compte des rivets d'assemblage des entretoises, il n'a que 10 pièces, tandis que la voie avec rail ordinaire, chevilles, traverses, coins, coussinets, en a 54 sur la même longueur. Le reproche de manque d'élasticité fait au rail-Barlow n'est pas exact d'une manière absolue, car la traverse ne contribue pas seule à donner à la voie ordinaire l'élasticité qu'elle a; la nature du ballast y est pour beaucoup; si donc la voie actuelle emprunte de son élasticité à la nature du ballast, la voie Barlow en empruntera également.

UN MEMBRE fait observer que le rail-Barlow n'est pas suspendu comme le rail sur traverses; qu'ainsi il doit être moins élastique.

UN AUTRE MEMBRE pense que le rail-Barlow exclut le ballast en pierres concassées, et souvent cependant on n'en a pas d'autre à employer.

UN AUTRE MEMBRE regarde l'intermédiaire du bois comme appui d'un excellent usage, et il cite à cet égard les bons résultats obtenus par MM. Clément Desormes et Verpilleux, qui fixent les bandages de roues motrices sur les jantes avec des coins en bois.

On fait observer que le rail-Barlow n'exclut pas l'emploi des traverses en bois; que M. Barlow les a même employées à l'origine; mais il a été conduit à les abandonner.

UN MEMBRE répond que cependant le rail-Barlow n'est pas fait pour être employé ainsi; sa forme n'est pas celle de plus grande résistance; que, si le rail-Barlow devait être posé comme rail ordinaire, on le placerait dans de mauvaises conditions. Les rails qui doivent être posés sur longrines sont

moins lourds que les autres, puisqu'ils sont soutenus sous toute leur longueur.

Des observations faites en Angleterre sur une voie Barlow ont indiqué que les trains, lors de leur passage, produisent un bruit sourd qui n'a rien de désagréable et qui indique une absence de trépidation, ce qui semble dénoter de l'élasticité.

UN MEMBRE pense que l'appui continu du rail-Barlow doit lui donner une grande stabilité, et que sa forme *en selle* lui donne toute l'élasticité désirable.

UN AUTRE MEMBRE dit que la forme du rail-Barlow doit exiger du fer de très bonne qualité et très homogène; que, par conséquent, il doit durer plus long-temps que le rail actuel.

UN AUTRE MEMBRE appuie sur ce point, que les Compagnies devraient demander aux forges du fer de meilleure qualité que celui qu'elles emploient pour les rails, et rejeter les fers à deux qualités, qui se soudent toujours mal; ce qui a encore lieu pour les rails a été cependant condamné pour la fabrication des bandages, où les deux qualités de fer ont été abandonnées complétement.

UN MEMBRE dit que la qualité a adopter pour les rails est une question complexe; qu'on ne peut préciser celle qui convient; il répète que l'usure des rails est peu de chose à côté des avaries qu'ils éprouvent, et qui tiennent surtout à leur pose, à leur défaut de fixité sur les traverses et les coussinets. Il pense cependant qu'un rail en fer homogène et même doux est préférable à un rail en fer dur et cassant, qui se dessoude et s'exfolie. Les avaries qui proviennent de l'emploi de deux qualités de fer sont les plus considérables dans la destruction des rails.

UN MEMBRE demande pourquoi, dans la voie Barlow, on n'a pas tenu compte de la dilatation, les rails étant rivés sur les traverses, et à leur jonction, sur une espèce de couvre-joint qui fait une seule pièce de la voie, quelle que soit sa longueur.

UN MEMBRE répond que M. Barlow s'était préoccupé de cette question, et qu'à l'origine, tous les 100 mètres, il avait relié les rails au moyen de boulons traversant des trous ovales; que, la dilatation n'ayant été remarquée sur cette distance que de 3 à 4 millimètres, il a fini par supprimer les boulons et les a remplacés par des rivets. Ces faits se sont passés en Angleterre; peut-être n'en serait-il pas de même en France, ou dans tout autre endroit plus au midi que l'Angleterre.

Dans une pièce aussi rigide, la dilatation devant nécessairement se reproduire, les effets doivent produire un soulèvement ou un affaissement de la voie.

UN AUTRE MEMBRE pense que l'enfouissement du rail-Barlow dans le ballast s'oppose à son échauffement, mais que cet effet de la dilatation se manifeste parfaitement dans les voies où l'on n'a pas laissé assez de jeu entre les rails; ainsi, on a vu des voies soulevées par l'effet de la chaleur. Ces exemples se sont produits au chemin de fer de Saint-Germain, à celui de Saint-Étienne, à celui de Corbeil.

Après ces observations, M. le président donne la parole à M. Pottier, pour achever la lecture de son mémoire sur le chauffage de l'église St-Roch.

L'AUTEUR du mémoire, après avoir rappelé en peu de mots les différents points qu'il a traités dans les parties précédentes, termine la lecture de son mémoire.

Il explique les mouvements de l'air dans l'église de la manière suivante : il constate que l'air entre dans le vaisseau, non seulement par les bouches de chaleur, mais aussi par des ouvertures accidentellement pratiquées dans le voisinage du sol. Il y a donc appel de l'air extérieur dans la partie inférieure de l'édifice. Comme, d'autre part, la température est très uniformément répartie, puisqu'elle ne varie pas de plus de un degré de la base au sommet, il en conclut que l'air monte et se répand très uniformément, forcé de suinter de toutes parts à travers les innombrables fissures du vitrage ; et, bien que la somme de ces fissures s'élève à 14 mètres carrés, le chauffage n'est pas moins possible, et même économique, à cause de l'étroitesse de ces fissures qui contracte les veines d'air de manière à en ralentir énormément la vitesse.

L'AUTEUR indique ensuite un moyen simple d'arriver à connaître, par la lecture d'un seul thermomètre, la température moyenne d'un vaste édifice.

Il termine en donnant les chiffres du prix d'établissement et d'entretien du calorifère de Saint-Roch, ainsi que la consommation de combustible pour les hivers précédents.

UN MEMBRE dit que depuis l'installation de ce chauffage on l'a beaucoup amélioré en chauffant la nuit, alors que tout est fermé dans l'église, et où, par conséquent, il n'y a pas de déperdition de chaleur; ainsi, maintenant qu'on chauffe la nuit depuis huit heures du soir jusqu'à six heures du matin, la consommation de combustible a été de 450 kilog. de charbon par jour, et la température ne varie que de 10 à 14°.

UN MEMBRE demande si le chauffage par la vapeur n'est pas préférable à celui à eau chaude ; il demande aussi à quel principe il faut donner la préférence, ou bien élever de grandes quantités d'air à une faible température, ou bien de petites quantités d'air à une haute température.

On répond que l'eau chaude permet une plus grande régularité, et que le premier principe est préférable. Dans certains chauffages, on donne aux conduits une grande section, par conséquent une faible vitesse à l'air échauffé ; on ne chauffe jamais l'air à plus de 50°, la température extérieure étant à 5°.

UN MEMBRE dit qu'il préfère le chauffage par calorifère à air chaud à celui à eau chaude ; il dit que la dépense d'établissement diffère du simple au double ; il pense également qu'il vaut mieux chauffer l'air qui se trouve dans un vaste local et le lui rendre que d'y envoyer de l'air chaud venant de l'extérieur. Il critique les conclusions du mémoire où il est dit que la dépense de combustible est proportionnelle à la surface totale des vitres et des murs. Suivant lui, l'auteur du mémoire a oublié de tenir compte de l'air emporté par la ventilation.

L'AUTEUR répond que ses conclusions ne se rapportent pas à toute espèce de chauffage et d'établissement ; que le coefficient qu'il a donné ne doit être appliqué que dans des cas semblables à celui qu'il a traité.

UN AUTRE MEMBRE résume les trois systèmes de chauffage en présence aujourd'hui :

1° Le chauffage à air chaud ;
2° Celui à eau chaude ;
3° Celui à la vapeur.

L'air exige, dit-il, des espaces trop vastes pour y être placé, en outre, l'air, par son passage sur les conduits en fonte rougie, se brûle et prend une odeur désagréable ; enfin, les causes d'incendie sont fréquentes ; la négligence des employés suffit à les causer.

Le succès des appareils à eau chaude tient plus à la crainte qu'inspirent les appareils à vapeur et à pression, qu'au mérite même de ce système, qui a aussi ses inconvénients. Ainsi, avec l'eau chaude, si une fuite vient à se déclarer, il est impossible d'y remédier ; l'eau bouillante se répand partout et peut causer de graves accidents, tandis que, dans les calorifères à vapeur, il n'y a qu'un robinet à tourner pour isoler complétement les appareils des conduits.

Un autre inconvénient de l'eau chaude, c'est de ne pouvoir être portée loin ; ensuite, c'est l'irrégularité de la température qu'elle donne, et la lenteur de la transmission de la chaleur. A Saint-Roch, par exemple, il faut trois jours de chauffage pour relever la température de 4 à 5°.

Quant au système à vapeur, il a tous les avantages du chauffage à eau chaude sans en avoir les inconvénients, surtout si on adopte, comme l'a très ingénieusement fait M. Grouvelle, des poêles ou bâches contenant de l'eau, et dans lesquels on fait arriver la vapeur par un tuyau de dérivation sur la conduite principale.

Ces poêles sont placés dans les chambres mêmes ou l'on veut entretenir une température régulière ; ce système mixte est très bon.

La vapeur peut être portée à toute distance, à 200 mètres, sans perdre beaucoup de sa température ; il n'en est pas de même de l'eau chaude. Et puis, comme à toute question de chauffage vient se joindre celle de la ventilation, on peut profiter de la vapeur pour faire marcher une machine qui elle-même fait mouvoir un ventilateur.

Ceci n'est dit que pour les grands établissements où cette dépense vaut la peine d'être faite, ou bien là où il y a déjà une force motrice qui fait marcher un atelier, une usine, etc.

L'AUTEUR du Mémoire fait observer que la ventilation n'est pas toujours nécessaire en même temps que le chauffage ; elle n'est pas employée dans les églises.

UN MEMBRE cite, à propos des inconvénients du chauffage par eau chaude, un commencement d'incendie qui a eu lieu au chemin de fer d'Orléans avec ce genre de calorifère ; en outre, ce genre de chauffage donnait un air qui n'était pas respirable.

UN AUTRE MEMBRE répond que ce calorifère était du genre des calorifères Perkins ; qu'on l'avait mal établi et sans ventilation. Il revient sur la question du chauffage à air chaud, et il dit qu'il l'a appliqué dans de grands établissements : à l'Opéra-Comique, où il y a sept appareils distribués dans le bâtiment ; au ministère de la guerre, où l'air, échauffé par les précautions qui ont été prises, n'a pas cette odeur de brûlé si insupportable à respirer. Ces précautions consistent à empêcher la fonte de rougir en la revêtant de briques ou d'argile.

Pour le chauffage à eau chaude, il cite le chemin de fer de Strasbourg, où l'eau circule et va jusqu'à 70 mètres de son point de départ sans qu'on remarque de grandes variations de température.

Il estime que le genre de calorifère à eau chaude est très bon là où la température doit être uniforme et continue.

Pour les établissements qui n'ont besoin d'être chauffés qu'une fois ou deux par semaine, les calorifères à air chaud sont préférables.

SÉANCE DU 2 AVRIL 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

M. LE PRÉSIDENT donne lecture d'une lettre de M. José Gil y Montana, directeur du chemin de fer de Barcelone à Mataro, relative à l'emploi des systèmes de traverses en fonte de M. Greaves, adoptées en Angleterre, et principalement pour les pays méridionaux, en Egypte, par exemple, par M. Stephenson ; et au Brésil, par M. Hankshaw.

Les rails peuvent être des rails à champignons ou des rails-Brunel, mais les traverses en bois sont remplacées par un coussinet portant une calotte sphérique creuse en fonte.

Le coussinet est semblable aux coussinets ordinaires. Ces calottes creuses ont $0^{m}.55$ de diamètre à la base et de 8 à 10^{mm} d'épaisseur ; le rayon de la sphère à laquelle elles appartiennent est de $0^{m}.31$. Elles sont reliées de distance en distance par des boulons en fer afin de maintenir l'écartement de la voie.

Les coussinets ainsi faits pèsent 40 kil., ceux intermédiaires 30 kil.

M. MONTANA joint à sa lettre copie de trois lettres de MM. Stephenson, Hankshaw et Drane, qu'il a consultés sur le meilleur système de voie à adopter dans les pays méridionaux.

M. STEPHENSON dit que l'expérimentation encore insuffisante du rail-Barlow, dont l'invention est récente, l'a conduit à adopter sans hésiter le système Greaves pour le chemin de Suez (Egypte), dont il est chargé ; il a fait commande de 14,000 tonnes de ces coussinets, dont la majeure partie est déjà expédiée.

M. HANKSHAW préfère le système Greaves partout où le ballast est du sable ou du petit gravier ; il l'a déjà employé avec avantage depuis quatre ans sur les chemins du Lancashire et du Yorkshire.

La lettre de M. DRANE, ingénieur du chemin de Greenwich, est écrite dans le même sens.

Le prix d'établissement de la voie Greaves, comparé à celui de la voie ordinaire avec traverse, lui est supérieur de 10 0/0 environ ; mais cette augmentation doit trouver sa compensation dans les frais d'entretien.

L'emploi du système Greaves a, sur celui des traverses, l'avantage d'être

plus solide et plus durable ; sur celui des dés en pierre, d'être plus simple et plus stable ; sur celui des plateaux en fonte, d'être plus stable et d'un bourrage plus facile. Il a sur ce dernier système le mérite de rendre le coussinet dépendant d'une manière absolue de l'appui sur le sol. Les voies se détruisent habituellement par le relâchement des attaches des coussinets sur les points d'appui.

M. POLONCEAU a ensuite la parole pour communiquer une note relative aux causes qui peuvent amener la rupture des essieux de wagons.

Détérioration des essieux des véhicules des chemins de fer.

Le gouvernement s'occupe aujourd'hui de savoir si, par le travail, les essieux des véhicules qui roulent sur les chemins de fer subissent une détérioration qui, au bout d'un certain temps, en rend l'usage moins sûr, et s'il y a lieu de prescrire leur changement après un parcours donné.

Il est donc de quelque intérêt de saisir la *Société des Ingénieurs civils* de la question, en lui apportant le résultat d'observations nombreuses qui ont été faites sur divers chemins de fer.

Sur le chemin de fer de Strasbourg à Bâle, après trois années environ d'exploitation, plusieurs essieux se sont rompus pendant la marche des trains. Ces accidents sont devenus de plus en plus fréquents, et sont bientôt arrivés à un certain nombre pendant le même mois.

Tous se rompaient au même endroit, c'est-à-dire dans le plan de la face intérieure du moyeu de la roue.

En cet endroit les essieux présentaient une diminution brusque de forme, soit à angle vif, soit en congé, et la rupture se produisait avec l'une ou l'autre de ces formes.

L'aspect de la cassure était invariablement le même. Près de la circonférence elle était teintée de rouille foncée indiquant une fente ancienne ; la teinte se dégradait jusqu'à disparaître en approchant d'un cercle central plus ou moins grand qui avait l'aspect d'une cassure fraîche.

La texture et l'aspect du cercle récemment rompu étaient identiquement les mêmes que ceux du corps de l'essieu et même des fusées. En dehors de ce cercle, qui présentait tous les caractères d'une barre de fer neuf que l'on brise, la couronne, atteinte par la rouille et paraissant une rupture plus ancienne, présentait une surface complétement plane, sans aucune trace d'arrachement, et d'un grain fin et uni, semblable à celle d'une barre d'acier fondu.

Enfin le cercle, conservant la texture naturelle du fer de l'essieu, présentait une particularité singulière : il était toujours excentrique et invariablement tangent à la clavette de calage de la roue sur l'essieu.

Sur un grand nombre d'essieux en service que l'on a fait rompre sous le mouton, tous sans exception présentaient des traces de la même détérioration, à un degré plus ou moins avancé.

Un fait remarquable, c'est que l'aspect de la couronne enveloppant la partie fraîchement cassée était toujours le même, à grain fin et uni, quelle que soit la nature du fer de l'essieu, qu'il soit à nerf, à grain fin ou à gros

grain cristallisé, tandis que le cercle de cassure récente présentait des arrachements et tous les caractères propres du fer avec lequel la pièce avait été faite.

De l'aspect de cette cassure on peut conclure, d'une manière certaine, que le fer n'a pas subi par le travail une transformation dans sa structure, puisque la partie brute, au moment de la rupture, conservait toutes ses propriétés, et que, soit dans la fusée, soit dans le corps de l'essieu, soit enfin très près du point de rupture, la cassure même du côté de la couronne de rupture ancienne, et près de la circonférence, le fer avait conservé toutes ses propriétés.

La fente qui se produit de la circonférence vers le centre ne semble s'expliquer que par une rupture successive des fibres du fer, par une séparation moléculaire qui s'opère graduellement par suite de l'extension et de la compression successives et répétées de ces fibres à chaque flexion en sens contraire que subit l'essieu :

1° Par suite de la charge portant sur les fusées en dehors des roues qui servent de point d'appui, combinée avec le mouvement de rotation de l'essieu, qui, à chaque demi-tour de roue, produit une flexion en sens contraire ;

2° Par l'action du rebord des roues sur les rails. Aux faits qui viennent d'être décrits si l'on ajoute que des essieux qui marchaient encore ont été retirés du service sans s'être rompus, quoiqu'ils fussent réduits à près de moitié de leur section primitive, on doit conclure que ce n'est pas par insuffisance de résistance que les essieux en question se sont rompus, mais bien par un travail successif d'allongement et de compression des fibres du fer qui dépassait la limite très restreinte au dessus de laquelle ce métal perd sa cohésion par un travail répété et après un long temps.

L'amplitude des extensions ou des compressions que le fer peut subir impunément est une question qu'il serait du plus haut intérêt de déterminer par des expériences spéciales.

On pourrait peut-être demander si cette altération ne proviendrait pas de quelques unes des causes autres que l'extension et la compression des fibres du fer parmi les actions si nombreuses que subit un essieu de wagon ou de machine ; mais ces ruptures se produisent également et de la même manière dans d'autres cas.

Ainsi, l'auteur de la note dit qu'il a eu l'occasion d'observer le même phénomène dans un arbre de transmission d'atelier qui avait des dimensions beaucoup plus fortes que celles reconnues nécessaires et généralement admises pour le travail qu'il avait à effectuer et qui, porté par des supports qui avaient tassé et le forçaient à fléchir en sens inverse à chaque demi-tour, s'est rompu et est tombé.

Enfin la rupture ayant toujours lieu, soit dans les essieux droits, soit dans les essieux coudés au point de plus grande extension et de plus grande compression des fibres, c'est-à-dire pour les premiers, dans le plan de la face intérieure du moyeu et pour les seconds à la rencontre du tourillon de la bielle avec le bras formant manivelle, on peut en conclure que c'est cette cause qui amène la rupture.

Un fait pour lequel les observations faites jusqu'ici ne fournissent pas d'explication aussi certaine, c'est l'excentricité du cercle conservé, sa tan-

gence à l'entaille de la clavette et l'absence totale d'altération du côté de cette entaille.

L'adhérence de la clavette par le frottement et l'uniformité de dimension que produit cette entaille peuvent donner lieu à une répartition de l'extension des fibres sur une plus grande longueur ; mais ces causes si faibles sont-elles suffisantes pour expliquer d'une manière satisfaisante le phénomène en question ? C'est, jusqu'ici, ce qui ne paraît pas certain.

Sur un autre chemin de fer, des essieux retirés du service pour défaut de force et de forme ont été examinés et rompus. Ils avaient fait au moins autant de parcours que ceux des chemins de fer d'Alsace et avaient la même forme et les mêmes dimensions. Néanmoins, et contrairement à ce qui avait été observé sur le premier chemin, une certaine quantité de ces essieux ne présentait aucune trace de commencement de rupture, d'autres n'offraient que des traces excessivement légères. Ces essieux étaient en fer puddlé de qualité ordinaire ; ce fer, à nerf court et foncé entremêlé de grains, comme du fer de cette nature, était mou et d'une structure lâche, assez imparfaitement soudé. Sur la même ligne, des essieux en fer dur au bois, à grain, de bonne qualité, se sont rompus en service et présentaient, quoique plus forts que les précédents, des traces de rupture analogues à celles décrites précédemment.

Il paraîtrait, d'après ces dernières observations, que les fers doux et d'un tissu lâche seraient plus favorables pour un long service que ceux en fer dur et serré. Ce fait s'explique, du reste, par l'extension que doivent subir les fibres dans les flexions dans les deux cas : plus la matière est poreuse et compressible, moins les fibres s'étendent pour une flexion donnée à égalité de diamètre. C'est cette raison qui fait mettre des âmes en chanvre dans les câbles en fil de fer soumis à des flexions, et qui fait qu'une corde molle résistera mieux à un ployage à angle vif qu'une corde très serrée et très dure.

De tout ceci on peut donc conclure :

Qu'il faut donner aux essieux une dimension sensiblement plus forte que celle calculée pour les efforts qu'ils ont à subir d'après les données qui servent aux cas ordinaires de la mécanique ;

Que l'on doit éviter avec soin de faire des diminutions brusques de diamètre pour les portées de calage des roues, une saillie d'un millimètre suffisant pour empêcher la roue de rentrer en cas de décalage ;

Que les portées de calage doivent être plus fortes que le corps de l'essieu, et que le diamètre doit diminuer graduellement depuis un peu au delà du plan de calage de la roue, jusqu'au milieu de l'essieu, de manière à présenter un solide d'égale résistance ;

Qu'il serait peut-être convenable de mettre trois clavettes au lieu d'une, ce qui a été fait du reste au chemin de fer d'Alsace lorsqu'on a renouvelé les essieux en 1843 ;

Enfin que des études très sérieuses seraient à faire pour savoir quel est le fer qui convient le mieux pour résister au genre de travail spécial qu'ont à supporter les essieux et qui ne paraît pas être celui qui est le plus estimé dans le commerce par les constructeurs, et qui est le plus cher.

Quant à la vérification des essieux en service, les fissures ne peuvent pas

être aperçues à froid, même en décalant la roue. Pour
tent, il conviendrait de prendre quelques essieux de
qui ont le plus marché), puis de porter au rouge cer
se produire la fissure, ce qui la rend apparente à cette t

On pourrait aussi et plus simplement huiler pendan
tiédissant l'essieu, puis ensuite le bien nettoyer et chau
sortir l'huile s'il y a une fissure.

M. LE CHATELIER, ingénieur en chef des mines, a
que l'enquête que le gouvernement veut faire sur la que
essieux est sans parti arrêté ; son but est de recueillir s
vations faites jusqu'à ce jour.

Il partage du reste l'opinion de l'auteur de la note
l'appui il cite un article qu'il écrivait en 1846 sur ce suj
d'accord avec les idées qui viennent d'être émises. Il y
les résultats obtenus par le même ingénieur au chemin
par quelques essais qu'il avait faits avec l'ingénieur du
rive gauche.

Tous les essieux qu'ils ont essayés ont pu être clas
ries : 1° ceux de mauvaise qualité, qui n'avaient fourni q
2° ceux de bonne qualité, qui en avaient fait de longs.

Les cassures des premiers étaient toutes franches av
cettes ; celles des seconds n'avaient pu avoir lieu qu'à la
chocs et présentaient des déchirures.

Quand les essieux sont de bonne qualité et que leur
ainé, ils cassent très peu ; ainsi au chemin du Nord on c
sieux ayant parcouru 200,000 kilomètres sans qu'il se so
cassure ; il n'y a donc pas de limite à assigner à la durée

Les cassures, ainsi que l'a fait remarquer l'auteur d
jours lieu au collet, et cependant il arrive souvent que l
contre lui ; ceci ne peut tenir qu'aux efforts de torsion t
à la portée de calage, et qui agissent en ce point par su
des diamètres.

UN MEMBRE demande si l'on a observé que le fer des
texture fibreuse à la texture lamelleuse à la suite des ch
soumis.

M. LE CHATELIER nie complétement l'existence de c
sieu casse, c'est parce que sa qualité est mauvaise, parc
gros. Sa texture est grenue non seulement à l'endroit d
dans tout autre point.

L'auteur de la note attribue beaucoup la cassure des
sition de la portée de calage et à la façon dont elle se ra
de l'essieu ; la forme cylindrique ou en décroissance co
lieu est la meilleure. Tout épaulement brusque à angle
mauvais.

UN MEMBRE a observé, sur le matériel du chemin d
de Belgique en 1845, des cassures analogues à celles ot
de la note sur les chemins d'Alsace ; les profils de ces ess
à peu près semblables. Le raccordement de la portée de

de l'essieu se faisait par un bourrelet. Aujourd'hui les essieux du chemin de fer du Nord ne présentent presque plus de différence de diamètre entre le corps de l'essieu et la portée de calage ; il y a cependant une sur-épaisseur sur le corps de l'essieu à dix millimètres environ du moyeu de la roue pour l'empêcher de s'échapper dans le cas où la clavette de calage sortirait.

UN AUTRE MEMBRE propose, pour remédier à la cassure des essieux, de multiplier le nombre des clavettes et de le porter à trois.

M. PHILIPPS, ingénieur des mines, pense que les ruptures tiennent plus à l'intensité des efforts de torsion qu'à ceux de flexion.

M. LE CHATELIER objecte à cette assertion que les essieux de messageries cassent également et qu'ils ne sont pas soumis à des efforts de torsion puisque les roues sont libres sur les essieux.

M. LE PRÉSIDENT ramène la discussion à son point de départ ; il dit que la question est de rechercher s'il existe des causes et des preuves d'altération du fer par le travail auquel il est soumis ; qu'il est admis dans l'artillerie qu'une pièce de canon est mise au rebut après un certain nombre de coups tirés ; que dans la marine il en est de même des câbles, des chaînes, qu'on met hors de service après un certain temps de navigation.

Ces idées de mise au rebut après un certain temps de service (temps pendant lequel on suppose que la résistance des métaux est modifiée) se sont répandues dans les autres administrations ; après l'accident du Mathieu-Murray on a reproduit toutes ces théories d'altération du fer ; mais la question n'a pas fait un pas, parce qu'on n'a pu en expliquer les causes ni apporter de preuves à l'appui de ces raisonnements.

Plus tard le gouvernement anglais s'est ému de la question et il a prescrit une enquête pour examiner les barres de fer semblables, soumises à des flexions ou à des chocs, se brisant sous des efforts égaux. Les expériences ont montré que le choc n'était pas plus dangereux que la pression, quand on ne sort pas des limites d'élasticité. Il en résulterait que la structure moléculaire n'est pas altérée par la nature différente de ces efforts.

M. LE CHATELLIER pense que les pièces d'artillerie, comme les câbles de marine, sont placées dans des conditions telles que les limites d'élasticité y sont dépassées et qu'alors le métal est dénaturé.

Si le bois empêche les essieux de casser, c'est parce qu'il détruit en partie les vibrations ; mais les cassures de ces essieux, qui sont ordinairement des essieux de messageries, sont en tout semblables à celles des wagons.

L'AUTEUR DE LA NOTE fait remarquer que tous les métaux ne s'altèrent pas de la même manière ; il y a une grande différence entre le fer et l'acier ; ce dernier résiste beaucoup plus ; mais ce qui influe surtout sur la durée des essieux, ce sont leurs dimensions ; des essieux forts et de bonne qualité dureraient indéfiniment.

UN MEMBRE cite une expérience faite par M. Weyckmann, ingénieur des chemins de fer en Allemagne, pour démontrer que le choc ne dénature pas la qualité du fer. Cette expérience a consisté dans le soulèvement et la chute d'une barre de fer par l'intermédiaire d'une came montée sur une roue et animée d'une très grande vitesse. Cette épreuve n'a en rien altéré la qualité du fer.

M. LE PRÉSIDENT termine la discussion en disant que le changement d'é-

tat du fer, qui ne peut se démontrer que par des observations, est loin d'être prouvé par l'expérience ; que l'opinion opposée paraît la plus répandue et la plus justifiée parmi les membres de la Société.

SÉANCE DU 16 AVRIL 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

UN MEMBRE demande à compléter la description qui a été donnée dans le résumé de la séance précédente relativement à des essais faits par M. Weidtman sur l'altération des essieux.

M. WEIDTMAN a cherché dans ses expériences à placer les essieux dans les conditions où ils se trouvent sous les wagons en leur faisant supporter les chocs, torsions et vibrations qu'ils supportent réellement dans la marche des convois.

Les essieux expérimentés ont été placés dans des paliers ; on leur a imprimé un mouvement de rotation rapide au moyen d'une poulie calée à l'une de leurs extrémités ; à l'autre extrémité, une came assez longue soulevait une espèce de pilier à chaque tour d'essieu.

Il y a là, comme on le voit, à la fois vibration, choc et torsion de l'essieu.

M. LE PRÉSIDENT invite ensuite M. le général Morin, présent à la séance, à vouloir bien donner son avis sur les causes d'altération qui motivent la mise au rebut des pièces d'artillerie après un certain temps de service.

M. LE GÉNÉRAL MORIN rappelle qu'il y a dans l'artillerie plusieurs principes très répandus, quelques uns contestables, mais qui tous ont leur origine dans les faits longuement observés. Parmi ces principes, il cite celui de l'influence des basses températures sur le fer. Les soldats de l'artillerie disent que le fer gèle ; cela signifie seulement qu'il est plus cassant lorsqu'il fait froid.

Ce fait s'observe d'ailleurs dans les fers en général.

Il cite à l'appui cette circonstance, qu'à Dantzick, où la température était de 20° environ au-dessous de 0, on a mis hors de service un grand nombre de pièces d'artillerie en cassant les tourillons avec un ou deux coups de masse seulement, tandis que dans les conditions ordinaires cela est beaucoup plus difficile.

Pour ce qui est de la mise au rebut des pièces au bout d'un certain temps de service, M. le général Morin l'explique de cette façon : c'est que la plus grande altération que les pièces éprouvent a lieu à l'endroit de la lumière. Dans les pièces en bronze il arrive que le métal est décomposé, l'étain se fond, et abandonne le cuivre en certains endroits ; dans les pièces en fonte, il se forme des fentes qui ne sont pas apparentes, mais qui s'étendent suc-

cessivement et finissent par provoquer la rupture des pièces. Comme ce fait se produit après un certain nombre de coups tirés, il est prudent de ne jamais atteindre ce nombre et de mettre les pièces au rebut lorsqu'elles sont arrivées à une certaine limite de service.

Il rappelle encore ces faits curieux de mode de cassure des projectiles lancés avec une vitesse plus ou moins grande contre des corps durs, des plaques de fonte, par exemple.

Ainsi, à une faible vitesse, le boulet s'aplatit au point touché, et il se dessine sur sa surface une série de cercles qui se divisent en tranches annulaires; lorsque la vitesse augmente, il se manifeste une pyramide à cinq faces, dont la base est la partie choquée et dont le sommet se trouve dans l'intérieur du boulet; enfin, à une grande vitesse, la pyramide est remplacée par un cône dont l'angle, au sommet, s'agrandit à mesure que la vitesse de projection augmente.

Dans tous ces phénomènes, il se développe une très grande chaleur, à ce point que la fonte prend une teinte bleu-violet.

M. LE GÉNÉRAL MORIN rapproche ces faits sur le boulet de ceux qui se passent dans les pièces de canon quand elles éclatent, et il n'hésite pas à voir la même cause dans ces effets produits, les uns par le choc et les autres par les vibrations répétées. Dans les pièces en fonte, quand elles ont tiré 2,000 à 2,600 coups, elles sont arrivées près de la limite de leur service; seulement, il n'y a pas de différence quant aux effets produits par les efforts du choc ou de pression.

Ainsi, Coulomb avait observé qu'une surface de pierre comprimée par un corps solide se brisait en formant des pyramides quadrangulaires. En faisant une épreuve par le choc en lançant des projectiles contre un mur en pierre de taille, et dirigés au milieu de chaque pierre, on a trouvé que chaque point choqué était également le sommet d'une pyramide à quatre faces, de sorte que quand toutes les pierres avaient été touchées en leur milieu, le mur était comme taillé en pointes de diamant.

Les effets du choc et de la pression étaient donc analogues quant aux ruptures.

La fonte employée pour les canons est de la fonte truitée très dure et beaucoup plus résistante que la fonte grise. Quant aux pièces en fer, elles avaient été écartées jusqu'en 1846. A cette époque, on a repris les épreuves; les moyens de soudage avec le marteau-pilon ont permis de forger des pièces passablement bien fabriquées; au Creuzot, on a fait des pièces de 16 et de 24; à Rive-de-Gier, chez MM. Petin et Gaudet, on a fait des pièces de 24, de 16, de 12, et des obusiers. Parmi ces pièces, il y en a qui ont tiré 2,600 coups avec la charge de 1/3 du poids du boulet. Les pièces bien soudées n'étaient nullement altérées, mais il s'en est trouvé de mal soudées qui ont peu résisté; c'est ce qui fait ajourner encore la reprise des essais et la solution de la question.

On a également essayé jusqu'à 2,000 coups, sans observer aucune déformation, une pièce venant d'Amérique et composée d'anneaux soudés à la presse hydraulique.

Toutes ces pièces bien faites n'ont donc subi aucune altération, et cependant dans le tir il se développe de grandes vibrations.

M. LE GÉNÉRAL MORIN pense que la nature du fer est la structure à grain, et non celle à nerf, et qu'il tend à la reprendre, soit sous l'influence de la chaleur, soit sous l'influence des vibrations.

UN MEMBRE fait observer que tout l'intérêt de la question est là. On a cherché si, dans les essieux, cette reprise de forme était la conséquence des longs parcours ; mais l'opinion contraire s'appuie sur un ensemble de faits ; et la longueur du parcours est tellement variable pour des essieux semblables, que l'on ne peut y voir une base suffisante d'observations. Il cite des essieux coudés de machines qui ont parcouru sur le chemin d'Alsace jusqu'à 270,000 kilomètres, et qui sont encore en service ; des essieux provenant de la même usine ne parcourent quelquefois que de 20,000 à 30,000 kilomètres.

M. LE GÉNÉRAL MORIN fait remarquer que la qualité du fer joue un grand rôle dans ces effets. Ainsi, bien que le fer doux s'allonge et se déforme plutôt que le fer dur, il résiste mieux aux chocs, subit des allongements plus considérables que le fer dur avant de se rompre.

UN MEMBRE dit que, s'il est vrai, comme le pense M. le général Morin, que la nature du fer soit celle du grain, et non celle du nerf, et que, s'il tend à reprendre cette première forme dans toutes les circonstances où il est placé, il y a tout intérêt à voir dès l'abord du fer à grain.

Il cite des essais de cémentation faits au chemin de fer du Nord, tant sur des essieux que sur des bandages qui ont indiqué dans la partie non cémentée la transformation du fer à nerf en fer à gros grain à facettes allant jusqu'à 1 centimètre de côté.

M. LE GÉNÉRAL MORIN répond que, s'il est vrai que le fer à grain est le plus dur, ce n'est pas celui qui résiste le plus long-temps ; il résistera à un effort où le fer à nerf céderait ; mais le travail mécanique total développé pour le casser sera moindre que celui développé pour casser du fer à nerf, et cette différence de travail est énorme, puisque, le travail de rupture pour le fer à grain étant représenté par 1, celui pour le fer à nerf, dans les mêmes circonstances, est représenté par 10 et quelquefois par 20.

UN MEMBRE fait remarquer que dans les forges on n'a jamais émis de doute sur la disposition moléculaire du fer ; que cette disposition est bien celle du fer à grain. Quand on veut faire passer du fer à nerf à l'état de fer à grain, il suffit de le faire rougir. Dans la fabrication du fer, il est parfaitement connu que les hautes températures avec de gros échantillons donnent du fer à grain, et que les températures basses avec de faibles échantillons donnent du fer à nerf.

UN AUTRE MEMBRE pense dès lors que, si réellement la température tend ainsi à transformer le fer, cette température se manifeste constamment dans les torsions et échauffements auxquels sont soumis les essieux et leurs fusées.

M. LE GÉNÉRAL MORIN fait observer que, quant à lui, il n'a pas à cet égard d'opinion parfaitement arrêtée, et que les éléments sur cette question manquent encore.

UN MEMBRE demande si les flexions auxquelles sont soumis les essieux ne développent pas une chaleur capable de dénaturer à la longue la qualité du fer.

UN AUTRE MEMBRE fait remarquer que, dans cette discussion, on perd de vue cette considération très grave que le poids des pièces, eu égard aux efforts auxquels elles sont soumises, modifie considérablement leur transformation. Il rappelle cette expérience de M. Arnoux qui a consisté à réduire successivement le poids d'un essieu de 57 à 52 kil., et que, arrivé à ce dernier chiffre, les ruptures étaient fréquentes. L'enclume et le marteau ne cassent que très rarement. Il cite encore cette observation de Brunel, qui avait remarqué que le simple mode de rupture du fer déterminait une certaine forme à grain ou à nerf, et qu'il en résulterait que l'apparence extérieure, après la rupture, ne serait pas un indice certain de la nature primitive.

Il fait observer que l'opinion ne pourrait se former sur ce point que par un ensemble de faits établissant l'altération du fer d'une manière aussi générale que l'est sa non-altération quand les dimensions d'usage sont suffisantes, que les faits cités à l'appui de l'altération sur le simple tracé, sans l'intervention de hautes températures, ont un caractère exceptionnel, et que les observations sont douteuses.

Il importe que l'on ne perde pas de vue que c'est par l'observation de faits généraux que la question peut être tranchée, et, quant à présent, cette observation manque aux défenseurs de l'opinion que l'altération se produit.

UN AUTRE MEMBRE observe que la question de temps ou de durée des actions joue un grand rôle dans tous ces phénomènes; que, si les marteaux et les enclumes ne se brisent pas plus fréquemment, c'est qu'ils travaillent pendant un quart d'heure au plus d'une manière continue, tandis que, dans les chemins fer, le travail des essieux se compte par heures.

M. LE GÉNÉRAL MORIN cite encore un fait, celui des fusils qui sont fabriqués en fer très doux, et qu'on trouve en fer à grain quand ils éclatent.

UN MEMBRE attribue beaucoup de la résistance des essieux à la façon dont les paquets qui composent les trousses de fabrication sont formées; la disposition des fibres doit, sans contredit, avoir une grande influence sur la résistance.

M. LE PRÉSIDENT ferme la discussion en priant les ingénieurs d'apporter à la Société toutes les observations qu'ils auront faites sur cette importante question.

SÉANCE DU 7 MAI 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

L'attention de la Société est appelée sur le tracé du chemin de fer de ceinture dans l'est de Paris.

Ce chemin, comme on le sait, doit relier dans cette partie de son tracé

les gares de Strasbourg, de Lyon et d'Orléans. Il ne se présente pas de difficultés entre les gares de Strasbourg et de Lyon : mais la réunion des deux gares de Lyon et d'Orléans exige la construction d'un pont sur la Seine, et c'est l'établissement de ce pont, le mode de construction qu'on veut y adopter, qui a soulevé déjà des observations et des réclamations de la part des communes de Bercy et de la Gare.

En effet, le pont, tel qu'il a été étudié par l'administration, ne sert qu'à relier les deux gares des chemins de fer ; on n'a rien ménagé dans sa forme, dans ses abords et dans sa construction, pour faciliter la navigation et desservir les nombreux établissements qui sont situés en cet endroit.

Ainsi, il existe à Bercy des celliers considérables qui reçoivent les vins de toutes les parties de la France ; sur les ports de la Gare, de la Râpée et de Bercy, il y a le dépôt des bois de construction et de chauffage, des matériaux de construction, tels que briques de Bourgogne, pierres de taille, etc. ; plus loin, dans Paris, on trouve l'entrepôt des vins, le marché aux fruits, le port au Blé ; sur le quai Saint-Paul, le dépôt des fers et fontes et des produits de la Marne. Les établissements qui bordent ces ports ont une valeur de quelques cents millions, et cependant ils sont complétement laissés en dehors dans le projet adopté pour le pont.

Il semblerait, au contraire, que le but d'un chemin de ceinture dût être de relier entre eux non seulement les gares de chemins de fer, mais toutes les gares qui apportent, dans une grande ville comme Paris, tous les produits destinés à sa consommation et au transit.

Les gares de marchandises des chemins de fer ne peuvent pas remplacer les quais et les magasins que nous venons de citer, car les marchandises ne peuvent y stationner, tandis que sur les ports c'est le contraire. Ces quais sont donc de véritables marchés où le consommateur vient s'approvisionner. L'étendue de ces différents ports, qui va jusqu'à 3,500 mètres de long sur 50 à 100 mètres de large, présente la superficie la plus considérable des établissements de ce genre dans Paris, et comme mouvement, c'est assurément aussi le plus considérable des ports de France.

Les provenances des rivières telles que la Seine, l'Yonne, la Marne, sont en possession d'alimenter Paris depuis des siècles, et depuis des siècles elles viennent sur ce point s'offrir pour la vente.

Dans ces dernières années, le conseil municipal a beaucoup amélioré les dispositions qu'offraient les deux rives pour le stationnement des produits, en faisant niveler et paver les ports et en les reliant par des rampes d'accès commodes aux larges quais qui des deux côtés bordent la rivière.

Les moyens d'absorption de ces vastes entrepôts sont tels, qu'aucun établissement n'a pu encore entrer en concurrence avec eux. Les canaux Saint-Denis et Saint-Martin, les gares de Grenelle et de Saint-Ouen, l'entrepôt des Douanes, du Gros-Caillou et celui des Marais, les magasins autour du bassin de La Villette, n'ont été que des tentatives vaines et infructueuses pour disputer à ce centre commercial une faible part de son mouvement.

Enfin la navigation de la Seine entre le Havre et Paris, qui s'opérait par des embarcations d'une dimension considérable, a été obligée de les abandonner et de faire construire un matériel qui pût lui permettre de traverser

les écluses des canaux Saint-Denis et Saint-Martin pour accéder au port de Bercy.

Le chemin de fer de Rouen n'a pu emmagasiner dans les établissements qui se sont formés autour de lui, ni une barrique de vin de Bordeaux, ni une pièce d'eau-de-vie, ni un fût d'huile, ni une caisse de savon ; tous ces produits vont retrouver les magasins des voies navigables. On voit donc l'intérêt que les chemins de fer ont de pénétrer dans le cœur de ces établissements : ils y amèneraient leurs wagons ; les produits apportés par cette voie partageraient avec ceux de la voie d'eau la faculté de libre stationnement dans le milieu du marché ; les frais de camionnage seraient en outre évités. Cette association entre les voies navigables et les chemins de fer ayant pour résultat de concentrer leurs arrivages et leur expéditions sur un point commun serait particulièrement utile à ces derniers.

Le commerce saisirait avec empressement celui des deux modes de transport qui lui assurerait le plus de célérité et de régularité ; la lutte n'existerait que sur les prix de transport, et les chemins de fer y gagneraient les frais de camionnage et évidemment les inconvénients de ces gares excentriques placées au hasard autour de Paris, en dehors de la portée et des habitudes du commerce. A côté d'un grand bien on éviterait un grand mal, celui de la perte de capitaux qui résulterait de la décentralisation des marchés, de la dispersion des magasins, de la perte de valeur de ceux qui existent, perte qui serait le résultat inévitable du système de chaque compagnie de chemin de fer de créer autour de sa gare des établissements spéciaux de magasinage et d'entrepôt.

Le projet de l'administration, s'il était exécuté, amènerait inévitablement la ruine de ces établissements.

Après ces considérations générales sur la nécessité de relier le chemin de fer avec le port de Bercy, on a exposé la question d'art, c'est-à-dire le moyen de donner à la forme du pont les dispositions propres à atteindre le but qui vient d'être indiqué.

La question de forme et de dimension dépend des conditions d'accès aux ports de la Seine et des exigences de la navigation.

Il y a deux systèmes en présence : un pont en pierre avec arcs surbaissés au 8^{me}, proposé par l'administration, et un pont à poutres droites en tôle, proposé par plusieurs ingénieurs civils.

Le pont en pierre doit avoir à la clef 1^{m},70 de hauteur. En outre, on exige pour la navigation une hauteur sous arche de 10 mètres à la clef, ce qui fait un total à l'étiage de 11^{m},70. Cette distance est la hauteur du rail à l'étiage, hauteur qui rend très difficile et presque impossible le raccordement du chemin de fer avec les quais, parce qu'elle exige des rampes considérables.

Le pont avec poutres droites, au contraire, ne demande sous poutre que 8^{m},50 et 0^{m},38 entre le rail et la ligne inférieure de la poutre ; total 8^{m},88.

Nous avons donc pour la distance du rail à l'étiage 11^{m},70 avec un pont en pierre et arc de cercle, et 8^{m},88 avec un pont en tôle à poutres droites, ce qui donne entre les deux une différence de 2^{m},82.

D'un autre côté, comme la hauteur moyenne des rives correspond à 5

mètres au dessus de l'étiage, il ne reste donc plus que $3^{m},88$ environ pour racheter la différence de niveau entre le quai et le chemin de fer, ce qui s'obtiendra facilement avec des rampes à chaque extrémité du pont; rampes ayant 200 mètres de long et 20 millim. d'inclinaison.

Enfin, si l'on voulait conserver le pont, qui a $11^{m}.70$, pour racheter la différence de niveau entre les chemins de fer de Lyon et d'Orléans, il y aurait lieu de construire un pont à deux étages qui se réuniraient sur un palier au delà des culées de droite et de gauche et les trains viendraient s'y aiguiller.

L'étage le plus élevé, celui de $11^{m}.70$, serait horizontal et relierait les deux gares de Lyon et d'Orléans; ensuite, de chaque côté de ce point, il y aurait une voie inclinée allant, l'une du sommet de la culée de droite au pied de la culée de gauche, et l'autre du sommet de la culée de gauche au pied de la culée de droite, afin de relier chaque quai avec la voie principale. Dans ce cas, la hauteur *minima* du rail d'une de ces voies latérales à l'étiage serait de $8^{m}.88$.

Le pont en tôle à poutres droites permet seul ce genre de constructions et cette disposition.

Quant à la hauteur de $8^{m}.50$ de débouché entre le pont droit et l'étiage, il est plus commode pour la navigation qu'une hauteur de $9^{m}.50$ à 10 mètres avec un pont en arc de cercle. En effet, pour les remorqueurs à vapeur, dont les tambours des roues dépassent la largeur du bateau et dont la surface supérieure forme un plan horizontal, un passage droit est toujours plus franchissable qu'un passage courbe.

Pour les remorqueurs à vapeur, $8^{m}.50$ donnent autant de débouché avec poutres droites que $9^{m}.50$ avec arcs surbaissés au 8^{me}; en outre, il y a dans le premier cas une facilité de passage qui n'existe pas dans le second.

La même observation s'applique aux chargements des charbons, des fagots, des foins, etc.

A côté de la question générale d'établissement pour ce qui se rapporte au chemin de ceinture, vient se placer une question de détail qui a une grande importance.

Le projet de l'administration consiste, comme nous l'avons déjà dit, en un pont avec arches en arcs de cercle d'une portée de 34 ou 36 mètres. On fait observer que cette portée est trop faible à l'entrée de Paris, dans l'endroit où la navigation est le plus active; dans un port où les bateaux ont à faire toutes leurs manœuvres, charger, décharger et tourner sur eux-mêmes. En outre, à Bercy même, le remorquage à vapeur est très actif (il s'opère sur cinq et six embarcations à la fois), et avec des arches étroites la direction des dernières embarcations remorquées devient difficile. Cette réduction de débouché gênerait donc le remorquage, entraverait la navigation, tandis que le pont en tôle permettrait facilement les portées de 45 à 50 mètres. C'est, comme on voit, une question grave encore, quoique secondaire.

On ajoute que le pont en métal pourrait permettre de ménager un passage pour les voitures et pour les piétons à côté de celui nécessaire pour la voie de fer.

Afin que chacun puisse étudier la question et soumettre ses observations, on propose d'en remettre la discussion à la prochaine séance.

UN MEMBRE dit que cette question a déjà été soulevée dans une confé-

rence des ingénieurs des chemins de fer, et qu'elle a émis le vœu que le chemin de fer de ceinture se reliât avec les établissements existants sur les quais de Bercy et de la Gare.

Il ajoute que le débouché de 8m.50 doit suffire, puisque le pont de Bercy, qui est à quelques mètres en aval de là, a la même hauteur au-dessus de l'étiage.

La construction de ce pont et le projet adopté par l'administration ont déjà ému les communes de Bercy et de la Gare; il y a eu des réclamations nombreuses: aussi a-t-on ajourné toute décision sur le système de pont, mais on a persisté dans la construction de piles distantes de 35 mètres; on en établit aujourd'hui les fondations.

UN AUTRE MEMBRE dit qu'on a proposé à l'administration un projet de pont en tôle avec portée de 50 mètres, et qu'avec ce projet on réalisait encore une certaine économie sur le devis du pont en pierre; les propositions n'ont pas été acceptées.

On rappelle que la hauteur comme la largeur du débouché est une question qui doit être résolue par le trafic.

Quant à la largeur, on voit, en comparant le Rhône et la Seine, une différence considérable dans l'importance des embarcations qui font le transport. Sur le Rhône, où la distance des arches est considérable, les bateaux à vapeur servent eux-mêmes au transport des marchandises; sur la Seine, au contraire, le défaut de largeur ne permet de les employer que comme remorqueurs.

Quant à la hauteur d'eau sur la Seine, les bateaux à vapeur peuvent encore passer avec 4m.25 de débouché quand toute autre navigation est suspendue. Mais avec cette hauteur peut-être les fourrages et les charbons de bois ne peuvent plus circuler. Leur arrivage à la gare de Bercy est secondaire, il est vrai, ainsi que leur importance.

Le but que doit atteindre le chemin de ceinture est, tout en reliant tous les chemins de fer, de porter les marchandises à l'intérieur de Paris dans le centre de la consommation.

Le pont en pierre, s'il est exécuté tel qu'il est projeté, n'améliorera en rien les conditions du marché et la facilité des arrivages pour Paris. C'est ici l'occasion d'accomplir l'ouvrage d'art le plus utile, le plus important qui puisse exister dans cette partie de la ville.

UN MEMBRE demande s'il ne vaudrait pas mieux abandonner Bercy et la Gare, et former ailleurs d'autres établissements qui fissent la concurrence à ceux existants.

UN MEMBRE répond qu'il est de ces industries qu'on ne doit pas chercher à déplacer, surtout quand elles reposent sur un capital aussi considérable que celui enfoui dans les établissements de Bercy, de la Gare et de la Halle aux vins.

UN AUTRE MEMBRE demande que dans la prochaine séance on borne la discussion à l'établissement du pont à deux étages qui a été proposé au commencement de cette séance, en abandonnant la question de passage pour piétons et voitures, pour laquelle les communes n'ont pas insisté.

Cette demande est approuvée. En conséquence, la discussion sur cette question aura lieu dans la prochaine séance.

M. NOZO donne ensuite communication d'une note relative *à l'emploi des alliages blancs dans les coussinets de machines et voitures.*

Les coussinets qu'emploie l'industrie mécanique sont assez variés. Depuis fort long-temps on connaît les coussinets en bois de diverses essences, les coussinets en os, en pierre dure, en cuivre, les coussinets en bronze de diverses compositions, en fonte ordinaire, fonte malléable trempée ou non trempée; enfin, les coussinets en métaux blancs de différents alliages.

Chaque fois d'ailleurs qu'il surgit, pour coussinets, une nouvelle matière, une nouvelle application, soit qu'elle se place ou non sous la protection d'un brevet, il va sans dire qu'elle présente toujours, d'après les innovateurs, des avantages supérieurs au mode précédemment employé.

Dans ces dernières années on a essayé d'introduire dans les chemins de fer l'usage des métaux blancs pour la construction et la réparation des coussinets de machines et voitures. Les alliages et les méthodes employés ont pris des noms différents; ainsi l'on connaît le régule, le métal antifriction de Grafton, le doublage Vaucher, le métal blanc de Destourbet, etc.

Notre intention n'est pas d'établir, quant à présent, l'analyse complète des avantages ou des inconvénients que peuvent présenter les applications énumérées ci-dessus; nous y reviendrons sans doute plus tard. Nous désirons seulement présenter aujourd'hui à la Société les résultats obtenus au chemin de fer du Nord dans l'application des bronzes et des métaux blancs pour coussinets de machines et voitures.

Au début de l'exploitation, 6,000 boîtes à graisse de tenders et voitures furent garnies de coussinets en métal antifriction Grafton. Après six mois d'usage seulement, un très grand nombre de ces coussinets étaient retirés du service et remplacés par des coussinets en bronze. Vers la fin de 1848, il ne restait sous les voitures qu'un nombre fort insignifiant de coussinets antifriction. La cause de ce retrait du service était le chauffage presque permanent des boîtes, par suite d'écrasement et d'entraînement du métal sous la pression, écrasement souvent assez considérable pour boucher complétement les lumières de graissage. Il en résultait, comme on le pense bien, une traction plus pénible avec les boîtes antifriction qu'avec les boîtes en bronze. Les choses en étaient même arrivées à ce point qu'un ingénieur des plus distingués avait donné, dès 1846, au métal *antifriction* le surnom caractéristique de métal *antitraction*.

Après ce premier échec, échec complet, la Compagnie se décida néanmoins à tenter un nouveau mode d'application du métal blanc, qui, tout en évitant les anciens inconvénients, devait apporter de grandes économies dans les frais d'entretien, dans ceux de graissage, et devait, par dessus tout, diminuer considérablement le frottement.

Au lieu de construire, comme autrefois, le coussinet entièrement en métal blanc, la nouveauté consistait à préparer d'abord une enveloppe en fonte ou en bronze d'une épaisseur convenable et à la remplir ensuite du côté du roulement avec une certaine épaisseur de métal blanc. La composition du métal était d'ailleurs assez variable, et l'opération portait le nom de doublage.

Voici ce qui advint de la nouvelle expérience :

Pour les machines, on reconnut presque aussitôt que la méthode du dou-

blage ne pouvait être appliquée aux boîtes à graisse là où la charge et la vitesse étaient très grandes. Un peu plus tard on reconnut qu'il en était à peu près de même pour les coussinets de bielles, et aujourd'hui le doublage n'est plus guère appliqué, avec une certaine efficacité, qu'aux colliers d'excentriques, qui n'offrent, comme on le sait, qu'une assez faible pression par centimètre carré.

Pour les wagons, le sort fut à peu près le même.

2,000 coussinets environ, d'après ce procédé, furent mis en expérimentation sous les voitures de toutes classes. On fut bientôt obligé de les retirer des voitures à grande vitesse, puis des wagons à forte charge, et il paraît tout à fait démontré aujourd'hui que leur application doit être bornée aux voitures à moyenne vitesse et à faible charge.

Les causes de ces éliminations successives des coussinets doublés sont identiquement les mêmes que celles qui ont motivé, dès 1846, le retrait des coussinets *antifriction*.

Nous pensons devoir encore rappeler, sur l'emploi des métaux blancs, ce que nous disions dans un Mémoire sur l'entretien des roues, inséré dans les numéros d'avril, mai et juin 1849, de notre Bulletin.

« Il résulte des recherches auxquelles nous nous sommes livré, que l'usure » moyenne des fusées extérieures est approximativement, sur le chemin de » fer du Nord, de *un millimètre* par 40,000 kilomètres parcourus... Ce » chiffre s'applique aux fusées non trempées, car il est certain que les fu» sées cémentées et trempées fourniraient un parcours plus considérable.

» Les faits que nous avons recueillis nous portent à croire que les fusées » les plus dures roulent dans les coussinets en bronze ; aussi les plus durs » fourniraient le maximum de parcours en même temps que le meilleur » service.

» On a beaucoup essayé et beaucoup vanté dans ces derniers temps des » métaux dits *antifriction* pour la construction des coussinets en général. » Nous ne saurions conseiller trop de prudence dans ces sortes d'essais, » car nous avons acquis la conviction que ces métaux *antifriction*, outre » les grandes difficultés qu'on rencontre généralement pour les obtenir ho» mogènes, présentent le grand inconvénient d'user beaucoup plus les fu» sées que les bronzes de bonne qualité.

» Cette plus grande usure paraît confirmée par les renseignements que » MM. Eugène Flachat et Polonceau ont bien voulu nous communiquer, et » desquels il résulte qu'un millimètre d'usure sur les fusées de Saint-Ger» main et d'Orléans, là où les métaux blancs ne sont point appliqués, cor» respond à un parcours de plus de 100,000 kilomètres. »

Ce fait de plus grande usure de collets en général, roulant dans des coussinets en métal blanc, en fer ou en fonte, à grains de nature tendre, avait d'ailleurs été constaté et décrit avant nous, par MM. Grouvelle et Jannez, dans leur *Guide du Chauffeur et du propriétaire de machine fixe*, page 214, édition de 1830.

Pour terminer l'énumération des résultats constatés au chemin de fer du Nord dans l'application comparative des métaux blancs et des bronzes pour coussinets, nous devons ajouter que, tout récemment, la Compagnie a construit et monté dans ses ateliers une machine propre à mesurer le frot-

tement des corps lubréfiés. Il y avait pour elle, comme on peut le penser, un haut intérêt à bien connaître les meilleures conditions du frottement, et tout spécialement à s'assurer si les prétendues propriétés du doublage se vérifieraient par l'expérience. Les résultats obtenus jusqu'à présent indiquent que le frottement que donnent les métaux blancs est sensiblement plus grand que celui que fournissent les bronzes.

Quoi qu'il en soit, l'exposé de tous ces faits ne peut avoir pour conséquence le rejet absolu de l'emploi des métaux blancs pour coussinets; car nous en connaissons de nombreuses applications dans les métiers, dans les moulins et même dans les machines à vapeur; mais notre conclusion serait cependant celle-ci :

Les métaux blancs, soit pour coussinets complets, soit pour doublage, ne sont applicables avec avantage que dans le cas de faibles charges et de moyennes vitesses.

M. LOUSTEAU donne ensuite communication d'une note relative à des essais de torsion faits sur des essieux de chemins de fer.

A l'époque de la réunion des ingénieurs et directeurs des chemins de fer allemands, au mois de février 1850, M. Krupp, fabricant d'acier fondu et propriétaire d'une usine importante à Essen, demanda qu'il fût nommé une commission parmi les membres de la réunion, pour procéder à des épreuves authentiques sur des essieux de wagons, en vue principalement de constater la bonne qualité des essieux en acier fondu qu'il fournissait depuis un certain temps au chemin de fer de Cologne à Minden.

La commission fut nommée, et les expériences eurent lieu dans l'établissement de M. Borsig, constructeur de machines à Berlin :

1° Sur des essieux entièrement en acier fondu;

2° Sur des essieux en fer et acier, le noyau et l'enveloppe extérieure étant en fer et séparés l'un de l'autre par un cylindre d'acier;

3° Sur des essieux tout en fer.

27 essieux furent essayés et rompus, savoir :

9 essieux en acier fondu de la fabrique de M. Krupp, à Essen;

4 essieux en acier fondu des usines de M. Werner, à Carswerck, près Neustad-Eberwald;

5 essieux en fer et acier de la fabrique de MM. Piepenstock et compagnie, à Hoërde, près Dortmund, dont 3 trempés et 2 recuits;

4 essieux en fer à mises de la Compagnie dite *Patentshafft and axletree Company* de Birmingham;

4 essieux en fer de la forge Piclaer, dans la Haute-Silésie;

1 essieu en fer de la forge Laura, appartenant à M. Oppenheim.

Ce dernier essieu avait déjà servi, tous les autres étaient neufs.

Les essieux furent soumis à trois sortes d'épreuves :

1° Epreuves pour constater la résistance à la torsion;

2° Epreuves pour constater la résistance au choc direct et instantané sur le corps de l'essieu;

3° Epreuves pour constater la résistance des fusées à la rupture.

M. LOUSTEAU se propose de mettre plus tard sous les yeux des membres de la Société les résultats intéressants de ces essais; il se borne, quant à présent, à donner la description de l'appareil qui a servi aux épreuves de torsion.

SÉANCE DU 21 MAI 1852.

Présidence de M. Ch. Callon, *vice-président.*

M. VICTOR BOIS donne communication d'une note sur un nouveau système de rail-longrine applicable aux chemins de fer, par M. Th. Guibal, professeur à l'Ecole des Mines à Mons.

Le nouveau système de construction de voies des chemins de fer qui fait le sujet de cette note a été conçu au point de vue de trois conditions principales à remplir, savoir :

1° *Substitution des métaux ;*

2° *Préférence à accorder aux supports longitudinaux ou continus sur les supports transversaux ou isolés ;*

3° *Maintien de l'élasticité de la voie qui tend à faire disparaître la suppression du bois.*

La valeur de ces trois principes est si complétement prouvée par l'expérience, qu'il est inutile de la démontrer et qu'il suffira d'en signaler les conséquences.

Par la substitution des métaux au bois, on compte réduire, sinon faire disparaître entièrement la dépense d'entretien due au prompt dépérissement de cette matière. En adoptant les supports longitudinaux continus, on a la certitude de réduire la surface de pose pour une même assiette obtenue, de constituer une voie plus régulière, plus résistante sans le secours de rails aussi lourds ; enfin, en rendant aux supports métalliques l'élasticité qui caractérise ceux en bois, on a l'espérance de conserver à la voie la douceur qui assure à la fois sa propre conservation et celle du matériel roulant.

De nombreuses tentatives ont été faites depuis quelques années pour réaliser ces trois conditions, souvent séparément, quelquefois réunies deux à deux, mais jamais toutes les trois ensemble.

C'est convaincu de l'importance de ces conditions que M. Th. Guibal a cherché la solution d'un problème qui occupe dans ce moment un grand nombre d'ingénieurs.

Le système proposé se compose essentiellement de longrines, sur lesquelles les rails reposent dans toute leur longueur et qui sont maintenues à une distance constante par des tirants placés au travers de la voie.

Les longrines, qui sont en fonte, se composent d'un patin, concave par dessous, de $0^{m}.30$ de largeur, qui forme l'assiette et la plaque inférieure de la longrine, et d'une nervure placée par dessus qui en occupe le milieu et règne sur toute la longueur. Sur cette nervure se pose et s'assujettit, à l'aide de clavettes et des entretoises déjà signalées, un rail en forme de gouttière

renversée sous lequel se trouve renfermée une languette de bois destinée à recevoir et à absorber les chocs.

C'est dans ces simples dispositions que tout le système consiste.

Cette combinaison satisfait aux trois premières conditions en effet.

On voulait substituer les métaux au bois, et dans le nouveau système le bois ne figure, pour ainsi dire, pas comme support, car la languette qui se trouve sous le rail, renfermée, abritée contre la pluie, hors d'atteinte de l'humidité du sol, ne peut dépérir, et, dans tous les cas, elle est d'une valeur si faible et d'un remplacement si facile, que lors même qu'elle éprouverait une détérioration, cette circonstance ne constituerait aucun inconvénient comparable à ceux qu'il s'agit d'éviter.

Quant à la supériorité des supports longitudinaux sur ceux transversaux ou isolés, elle est réalisée aussi intégralement que possible, puisque, malgré le peu de surface de pose obtenue (30 décimètres carrés par mètre courant de rail), l'assiette réelle de la voie est encore plus grande que par le système des traverses; et l'on remarquera en outre que, par leur forme concave, ces longrines conserveront le ballast au dessous d'elles, tout en n'opposant pas au damage les difficultés qu'occasionnerait une concavité trop prononcée.

Enfin l'élasticité ou plutôt l'amortissement des chocs est garanti par la présence de la languette de bois interposée entre le rail et la longrine, et cela sans arriver à cette élasticité trop grande qu'il faut éviter dans la voie des chemins de fer, où elle ne pourrait constituer qu'une résistance à la traction de la nature de celles que l'affaiblissement du sol développe sur les routes ordinaires. L'amortissement des chocs, au contraire, est nécessaire autant pour la conservation de la voie que pour celle du matériel roulant; n'est-ce pas dans ce but que toutes les voitures, même celles qui sont destinées au transport des marchandises, sont munies de ressorts de suspension? N'est-ce pas dans ce but encore qu'on a proposé d'adopter les roues à rais de fer, et celles, plus élastiques encore, qui sont garnies entierement de bois entre le bandage et l'essieu?

Pour établir l'économie de premier établissement de ce nouveau système, nous prendrons comme point de comparaison la dépense qu'occasionne à l'Etat l'établissement d'un mètre courant de voie en Belgique.

D'après les documents publiés par le gouvernement, le mètre courant de voie simple des chemins de fer de l'Etat coûte 28 fr. 49 c., tandis que le prix du mètre courant de voie simple de ce nouveau système ne coûte que 27 fr. 37 c.; il y a donc une économie de 1 fr. 12 c. par mètre courant; ajoutez à cela l'économie de l'entretien qui est considérable et sur laquelle nous reviendrons plus tard.

CONDITIONS TECHNIQUES DU NOUVEAU SYSTÈME.

Pour apprécier le système nouveau sous le rapport technique, nous remarquerons que les conditions nécessaires pour constituer une bonne voie sont les suivantes.

1° Stabilité complète et uniforme dans toute l'étendue de la voie;

2° Égalité constante pendant l'usage, et absence de chocs;

3° Simplicité et facilité de pose;

4° Enfin, entretien facile et réparations promptes.

1° *Stabilité*. La stabilité des rails posés sur longrines est incontestablement plus grande que celle des rails établis sur traverses, cela est reconnu aujourd'hui; c'est à ce point qu'en Amérique, où ce système est exclusivement adopté, les lignes sont mises en exploitation, pour ainsi dire, au fur et à mesure que la voie est posée, et cela sans que des affaissements de remblais y opposent l'obstacle qu'on rencontre pour tout autre système.

Il est évident, d'ailleurs, que la raideur accumulée des rails et des longrines, jointe à la meilleure répartition de la pression sur le sol, met celui-ci à l'abri des tassements partiels, qui sont si fréquents avec le système des billes, et si redoutables dans leurs effets; quant à l'uniformité de la stabilité, le système des longrines est le seul qui la fournisse d'une manière complète, puisque dans tous les autres, suivant que la charge s'exerce sur un point d'appui du rail ou en un point intermédiaire, celui-ci résiste ou fléchit, quelque résistant qu'il soit d'ailleurs; et il en résulte par rapport au matériel roulant, surtout à grande vitesse, un effet analogue à celui que produiraient des aspérités successives, et cet effet se révèle par des chocs multipliés.

2° *Egalité*. Les circonstances dont nous venons de parler ne tardent pas à détruire l'égalité de la voie; la flexion générale ou partielle des rails chargés produit le soulèvement de leur extrémité, que la voiture suivante vient heurter et appliquer sur le coussinet avec violence, ce qui amène le meurtrissement des deux pièces et la mise hors de service des rails dans un temps quelquefois très court. C'est la constatation de ce fait qui a porté plusieurs ingénieurs anglais, du plus grand mérite, à adopter l'assemblage des rails à l'aide de plaques latérales en fer logées entre les bourrelets et serrées par des boulons dont la disposition toute récente est due à MM. Richardson et Robert. Les mêmes faits ont aussi donné naissance à toute une série de supports de joints qui offrent une grande surface d'appui et constituent une sorte de longrine au point de l'assemblage des rails. Parmi ces nouveaux coussinets de joints, nous pouvons citer ceux de MM. Samuel James. Enfin, c'est dans la même intention qu'au chemin de fer de Magdebourg à Brunswick, où les rails du système Vignoles sont adoptés, on a placé réellement des longrines en bois sous les joints, tandis que les points d'appui intermédiaires sont soutenus par des traverses.

Il est évident, en conséquence, que les longrines continues ne peuvent pas présenter l'inconvénient auquel les longrines partielles ou les dispositions équivalentes obvient, et que notre voie offrira, dès le principe et toujours, l'égalité que les autres ne présentent que rarement quand elles sont nouvellement établies, et jamais après quelque temps de service. Pour éviter le meurtrissement de cette languette de bois, qui pourrait avoir lieu aux extrémités, et pour l'abriter contre la filtration des eaux par le joint, l'auteur se propose de les recouvrir en ce point d'une plaque mince en tôle.

3° *Simplicité*. Quant à la simplicité du système, à la facilité de la pose, de l'entretien, et à la promptitude des réparations, toutes ces conditions sont réalisées par cette disposition.

Les longrines une fois présentées sur le sol et mises à peu près dans leur

position, le rail d'une part et les entretoises d'autre part, en assureront la continuité et le parallélisme, en sorte qu'il n'y a plus qu'à opérer le damage du sable sous la partie concave, ce qui ne peut offrir aucune difficulté et n'exigera que peu de temps. S'il s'agit de renouveler une longrine ou un rail, l'opération s'exécute avec facilité et promptitude; car, dans la première hypothèse, les longrines adjacentes déterminent rigoureusement la place de celle qu'il s'agit de poser, et dans le second cas, les longrines n'ayant éprouvé aucun changement de position, il suffit de soulever le rail usé et de lui en substituer un autre.

En résumé les questions à résoudre sont les suivantes :

Faut-il, dans l'établissement de la voie, chercher à supprimer le bois?

Faut-il donner beaucoup d'assiette avec peu de surface d'appui, et en conséquence adopter les longrines?

Faut-il réduire le poids des rails, qui se détériorent plus qu'ils ne s'usent?

Faut-il enfin restituer à une voie totalement métallique l'élasticité, ou mieux, la propriété d'absorber les chocs que la suppression complète du bois lui enlèverait?

Nous pensons qu'on sera d'accord pour répondre affirmativement à toutes ces questions, et c'est dans le but de remplir toutes ces conditions que le système actuel est présenté.

UN MEMBRE demande si la longrine en fonte est continue, ou bien si elle est interrompue.

M. V. BOIS répond qu'il présente à la Société les deux systèmes : 1° la longrine continue en fonte, qui est due à M. Th. Guibal, et 2° la longrine interrompue, qui n'est qu'une modification qu'il a faite au premier système.

Le système à longrine interrompue se rapproche du système de coussinets à plateaux de Greaves.

L'ordre du jour appelle la discussion sur le tracé du chemin de fer de ceinture dans l'est de Paris.

UN MEMBRE dit qu'il ne voit pas la nécessité d'abaisser le tablier du pont, puisque la pente est continue et régulière à 6 millim. du chemin de Lyon au chemin d'Orléans. Que si l'on abaissait le niveau de $11^{m}.70$, cela n'aurait d'autre but que d'augmenter d'un côté la rampe de 6 millim.; que, quant au moyen de relier le chemin de ceinture avec les quais, on peut le faire par des rampes latérales.

Il exprime ses préférences pour un pont en tôle, au point de vue du développement qui pourrait en résulter pour notre industrie métallurgique.

UN AUTRE MEMBRE pense qu'il n'y a pas lieu à se raccorder en ce point avec les quais; que le trafic ne sera jamais assez important pour motiver en cet endroit la composition ou la décomposition des trains; qu'une station à quelque distance de là serait suffisante.

UN MEMBRE fait observer que le raccordement avec les quais ne peut avoir lieu que sur le pont et à l'aide d'un pont à étages.

Il pense que le trafic sera considérable, et qu'il faut, dès aujourd'hui, prendre toutes les dispositions pour le recevoir.

UN AUTRE MEMBRE donne quelques renseignements sur la hauteur des eaux en cet endroit.

Il dit que le pont en pierre doit avoir 10 mètres de hauteur sous arches, à la clef, et l'on propose pour le pont en tôle, avec poutres droites, une hauteur de 8m.50.

Les hauteurs des plus hautes eaux connues sont repérées aux échelles des ponts de Paris. On voit, au Pont-Royal, que la crue de 1740 a monté à 8m.60, et au pont de la Tournelle, que la crue de 1658 a monté à 8m.25. Quoique le pont Marie, qui lui fait suite, offre en plus aux eaux un débouché assez considérable, il résulterait donc que, si la Seine venait à atteindre ces élévations, il ne resterait plus de passage entre les eaux et la partie inférieure du pont. Des corps flottants s'accumuleraient à l'amont et pourraient produire de graves dégâts.

Il rappelle ensuite ce qui est arrivé sur le Rhône en 1840 : tous les tabliers des ponts qui n'avaient qu'une assez faible hauteur au dessus des plus hautes eaux connues furent atteints par la crue de cette année, qui s'éleva à 0m.80 au dessus des précédentes. Beaucoup de ponts furent emportés. On les reconstruisit en relevant les tabliers, et l'on en fit autant à ceux qui avaient résisté. Il est question de relever ceux de la Saône, que l'on trouve trop bas.

Bien qu'il existe des ponts sur la Seine qui ont une hauteur inférieure à celle exigée pour le pont de pierre, il y en a d'autres aussi qui se rapprochent très près de cette hauteur; par exemple, le pont d'Ivry a 9m.67 sous l'arche du milieu, qui a 24 mètres d'ouverture et 3m.60 de flèche. S'il y a un choix à faire, il est préférable de prendre la plus grande hauteur.

Si l'on examine la question au point de vue de la navigation, il y aura toujours avantage pour celle-ci à avoir une grande hauteur pour le passage sous les ponts; les eaux montant à 4 mètres submergent les chemins de halage; la remonte des bateaux cesse, il est vrai, mais les bateaux chargés qui descendent peuvent naviguer aisément avec des eaux plus élevées que le chemin de halage. Le manque de hauteur sous les ponts seul les arrêtera. Comme ces bateaux ont généralement des chargements assez élevés, le pont en pierre leur offrira toujours, en plus du pont de tôle, le segment, ayant 20 mètres de corde et 1m.50 de hauteur. Il y aura aussi avantage pour le navigateur à vapeur.

Il y a donc lieu d'examiner sérieusement la question d'abaissement du pont; elle intéresse à la fois la conservation du pont et la navigation.

UN AUTRE MEMBRE pense qu'on peut raccorder les quais avec le chemin de ceinture au moyen de rampes latérales au-delà du pont.

Il dit ensuite que les communes de Bercy et de la Gare demandent instamment un passage sur le pont pour les piétons et pour les voitures, et qu'il y aurait possibilité de l'accorder au pont destiné au chemin de fer. Ce passage semble tellement nécessaire que ces communes offrent 50,000 fr. pour ce travail.

UN MEMBRE demande si réellement les ponts en tôle sont plus économiques que les autres, car, jusqu'ici, on n'a aucune donnée sur ce sujet.

Il dit que l'on peut établir des ponts en fonte n'ayant au milieu que 0m,50 entre l'intrados des fermes et le niveau des rails, et que ces ponts peuvent être construits à deux voies à raison de 3,000 fr. le mètre courant, tout compris.

UN AUTRE MEMBRE répond qu'il a proposé à l'administration de construire le pont de Bercy (la tôle seule) à raison de 2,000 fr. le mètre courant.

SÉANCE DU 4 JUIN 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

L'ordre du jour appelle la continuation de la discussion sur le tracé du chemin de fer de ceinture dans l'est de Paris.

UN MEMBRE fait observer que cette discussion a perdu aujourd'hui toute son opportunité, le Conseil des ponts et chaussées, appelé une seconde fois à donner son avis sur la question, ayant maintenu sa première décision.

Le Conseil ne s'étant pas arrêté à l'opportunité du raccordement du chemin avec les ports qui bordent la Seine, la question se trouvait réduite au choix à faire entre un pont en tôle et un pont en pierre. A cet égard, le Conseil des ponts et chaussées paraît avoir exprimé sa répugnance relativement à l'emploi du fer et de la tôle dans les constructions de ce genre, et il est revenu au premier projet, celui d'un pont en pierre.

La Société des ingénieurs civils avait, dans une première séance, reconnu la nécessité de relier le chemin de ceinture avec les ports de la Seine au moyen du pont qui doit la traverser à Bercy ; quelques membres avaient également pensé qu'on devait profiter de la construction de ce pont pour y établir un passage pour les piétons et pour les voitures. Cette seconde question ayant été écartée, il avait été proposé, comme point de départ de la discussion, plusieurs solutions. Ainsi, on avait proposé un pont à 2 étages venant rejoindre les quais par une pente ; on a proposé un raccordement direct sur le remblai au moyen d'une courbe ; on a également proposé des systèmes de drops.

Tout développement sur ces projets serait aujourd'hui inutile à la suite de la résolution prise une seconde fois par le Conseil des ponts et chaussées.

En conséquence, on propose de retirer la question de l'ordre du jour. Cette proposition est adoptée.

Il est ensuite donné lecture d'une lettre de M. Th. Guibal, dans laquelle il ajoute quelques développements sur l'établissement de son système de voie.

Les principes qui l'ont guidé sont les suivants :

1° Conserver le bois dans l'établissement des voies pour y maintenir l'élasticité ;

2° Donner la préférence aux supports longitudinaux continus sur les supports transversaux ou isolés.

Il demande qu'on veuille bien discuter son système à ces deux points de vue, soit en séance publique, soit dans une séance de commission.

UN MEMBRE fait observer que jusqu'ici il n'a été fait généralement usage que de deux formes de rails :

1° Les rails à double T, dont la forme est de plus grande résistance dans le sens vertical et posés sur supports isolés ;

2° Les fers à large base fixés sur supports longitudinaux continus, tels que le rail Brunel, ou le rail Barlow, dont la forme offre celle de plus grande résistance dans le sens latéral.

Le rail que présente M. Th. Guibal ne lui paraît remplir aucune de ces deux conditions ; sa forme n'est pas celle d'un double T, et sa surface d'appui sur la fonte est beaucoup trop faible.

UN MEMBRE répond que dans ce système de liaison du bois, de la fonte et du fer par l'intermédiaire des clavettes, fait du tout un système rigide invariable ; que, dès lors, sa surface d'appui n'est plus celle du rail sur la fonte, mais celle de la fonte sur le sol ; que ce système alors prend, comme solidité et base d'appui sur le sol, les avantages qu'offre le rail Barlow.

UN AUTRE MEMBRE pense que, dans les courbes, sous la pression et les chocs latéraux développés par les puissantes machines dont la charge sur une paire de roues va jusqu'à 12 tonnes, les clavettes se desserreront, le bois sera soumis à un effort de compression auquel il ne résistera que difficilement.

Il insiste sur le fait de la compression du bois, qui lui semble être une objection sérieuse à ce système, et, quel que soit le rapprochement des clavettes, ce rapprochement ne peut s'opposer à ce qu'elles se desserrent.

UN MEMBRE répond que, les clavettes étant espacées de $0^m,50$ en $0^m,50$, ce rapprochement empêchera les oscillations que pourrait prendre le fer dans l'intervalle.

UN AUTRE MEMBRE demande si le point de jonction de deux rails n'est pas un point faible.

On répond que les joints des fontes et des rails sont croisés de façon à ne jamais se trouver ensemble au même point.

LE PRÉSIDENT propose de renvoyer l'examen de ce système à la commission des chemins de fer. Cette proposition est adoptée.

M. H. MATHIEU donne ensuite communication d'une note relative à la reconstruction en tôle du pont de Clichy sur le chemin de fer de Saint-Germain.

SÉANCE DU 18 JUIN 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

M. NOZO donne communication de deux notes : l'une sur l'emploi des feux couplés à vent forcé dans les travaux de chaudronnerie ; et l'autre sur

l'emploi du régulateur oscillant dans les machines locomotives. Dans la première il fait remarquer que l'application du coke à tous les travaux de chaudronnerie exécutés dans les ateliers du chemin de fer du Nord a amené à construire et à appliquer un système de feux couplés à vent forcé.

Ce système consiste en deux feux montés sur roue. Le vent est donné, sous la grille, par des boyaux en cuir branchés sur les galeries du ventilateur.

Les fours se trouvent évidés à la partie inférieure pour faciliter la mise en place des tuyaux, quelles que soient les courbures qu'ils affectent.

Lorsqu'une soudure se présente à faire, on commence par enfoncer les deux amorces de la soudure l'une dans l'autre; puis on hisse le tuyau au moyen d'un palan fixé après un petit chariot roulant sur un rail suspendu, on fait arriver la partie à souder au-dessus des gueulards des fours; le bas du tuyau se trouve soutenu, pendant la durée de l'opération, par un plateau mobile sur une tringle en fer.

Toutes les précautions d'usage étant prises pour l'application de la brasure, on donne le vent dans les deux feux; la flamme sort à la fois par les deux ouvertures latérales en embrassant complétement le tuyau; on approche alors successivement les deux feux de manière à toujours chauffer régulièrement le tuyau tout au pourtour. L'on obtient ainsi, même pour les tuyaux du plus fort diamètre, des soudures irréprochables.

L'économie qui résulte de l'emploi de ces nouveaux appareils est facile à prévoir en comparant le nouveau mode à l'ancien. Avant l'emploi des feux mobiles à vent forcé, pour souder un tuyau on construisait, avec de la tôle enroulée, un fourneau percé de trous; on plaçait et l'on maintenait le tuyau dans ce four à la hauteur convenable au moyen de fils de fer; la position arrêtée, on jetait du charbon de bois enflammé autour du tuyau; puis, pour faciliter l'entrée en fusion de la soudure, on soufflait au moyen de deux ou trois tuyères, en ayant soin de remettre fréquemment de nouveaux charbons dans le four ainsi improvisé. La soudure une fois faite, on enlevait le charbon, qui, le plus souvent, par la négligence des ouvriers, achevait de se consumer dans l'atelier, lorsqu'on n'avait pas un tuyau tout préparé pour une seconde opération. De plus, avec ce mode de chauffage, on ne pouvait employer que des morceaux de charbon choisis.

Toutes ces sujétions disparaissent avec le nouveau système : le charbon de bois est remplacé par du vieux coke ou du menu coke. Le fourneau que l'on était obligé de renouveler souvent pour cause d'usure, est remplacé par un four solide garni intérieurement de briques réfractaires.

Quand une soudure est faite, comme on cesse de donner le vent, le coke peut attendre une seconde opération avec une consommation presque nulle.

RÉGULATEUR OSCILLANT DANS LES MACHINES LOCOMOTIVES.

Les régulateurs des machines locomotives, placés dans des dômes situés soit au dessus de la boîte à feu, soit sur le corps cylindrique, se raccordent généralement avec la plaque tubulaire de la boîte à fumée, au moyen d'un

long tuyau en cuivre rouge relié d'un bout au régulateur, tantôt par un presse-étoupe, tantôt par un joint conique, et fixé de l'autre bout à la plaque tubulaire de la boîte à fumée par un joint plat.

Divers inconvéniens graves naissent de ce mode de montage des régulateurs. Lorsqu'on emploie un presse-étoupe, des fuites très fréquentes ont lieu à travers l'étoupe, et l'on éprouve les plus grands embarras pour refaire la garniture. Dans le cas d'un cône, les fuites, il est vrai, sont moins fréquentes, l'entretien moins coûteux; mais il existe toujours des difficultés assez grandes pour faire avec précision les deux joints simultanément; car il est rare que les effets de dilatation qui viennent s'ajouter aux tensions ou aux pressions initiales qu'éprouve presque toujours le tuyau après le montage, n'amènent pas des fuites assez fréquentes pour qu'il y ait un certain intérêt à chercher une disposition à l'abri de cet inconvénient.

On a récemment employé au chemin de fer du Nord un régulateur qui paraît devoir remplir, aussi bien que possible, toutes les conditions de facilité de montage, de sûreté de joint et de mobilité à suivre tous les mouvements de dilatation.

Ce régulateur présente les mêmes dispositions générales que les anciens régulateurs; la seule différence consiste dans l'addition, sur les côtés de la *tête-de-mort*, de deux tourillons venus de fonte que l'on fait reposer sur les paliers d'un support double fixé après le dôme.

Pour assurer la position du régulateur, les tourillons sont maintenus par deux petits chapeaux.

On voit, par cet exposé, que le régulateur peut facilement se mouvoir et obéir à la dilatation, et que les joints ne présentent plus par conséquent les causes de fuite signalées dans les anciens régulateurs.

M. LAVALLEY donne ensuite lecture de son mémoire formant la deuxième partie du compte-rendu de la reconstruction du pont de Clichy.

UN MEMBRE fait observer que M. Lavalley a posé d'une manière peut-être trop absolue la supériorité des ponts en tôle sur les ponts en fonte pour les grandes portées.

L'exemple qu'il a pris du pont en fonte de Saint-Denis répond à un système de construction dispendieux et peu rigide. Il est généralement admis parmi les ingénieurs anglais que si les culées d'un pont sont assez solides pour résister à la pression des arches, l'emploi de la fonte en arcs de cercle doit être préféré à la tôle en poutre; et comme derrière les culées des ponts il y a presque toujours des remblais à soutenir, ces culées doivent être solides.

M. LAVALLEY explique qu'il existe un système de pont où l'on peut employer la tôle à la compression comme dans les ponts en fonte; que ces ponts sont formés d'arcs convexes en tôle dont les extrémités sont reliées par une poutre droite formant corde et soutenant le plancher qui prend son appui principal sur l'arc en tôle au moyen de bielles de suspension (comme dans les ponts suspendus); que ce système, nommé en Angleterre *bow string*, fait rentrer la construction des ponts en tôle dans celle des ponts en arcs en fonte, quant à la façon dont les métaux travaillent, tout en détruisant la poussée qui peut s'exercer sur les culées; que, par conséquent, on trouve ainsi dans la construction même du pont en tôle les avantages des ponts en fonte, avec un coefficient de résistance supérieur.

La discussion de ce mémoire sera continuée à la prochaine séance.

M. LE PRÉSIDENT donne lecture d'une lettre de MM. Richy et Gueyrard, par laquelle ils réclament contre le résumé de la séance du 7 mai ; ils déclarent que depuis cinq ans qu'ils ont des entrepôts aux Batignolles, ils ont constamment contenu 7 à 800 barriques de vin, eaux-de-vie, savons, sucres et tous autres produits.

Il donne également communication d'une lettre de M. Evrard, qui traite de la rupture des essieux ; cette lettre est renvoyée à la section des chemins de fer.

SÉANCE DU 18 JUIN 1852.

ASSEMBLÉE GÉNÉRALE.

Situation financière de la Société au 18 juin, présentée par le Trésorier.

Nombre de sociétaires.

Le nombre des sociétaires inscrits au registre matricule à la date du 26 décembre 1851 était de.	300
Les membres rayés des contrôles, par décision du comité, pour retards trop prolongés de leurs versements, sont au nombre de. . .	58
Différence.	242
Les membres nouveaux admis pendant le semestre sont au nombre de.	15
Ainsi le total des sociétaires à la date du 18 juin est de.	257

Sommes dues, versées et à recouvrer.

	f.		
Il était dû, le 26 décembre 1851, par 242 sociétaires. . .			1,51[f.]335
A ajouter :			
La cotisation des mêmes sociétaires pour l'année 1852.	5,808	»	
La carte d'entrée et la cotisation pour 1852 de 15 membres nouveaux.	735	»	
Les amendes pour absences non justifiées aux séances du comité.	83	»	
Les ventes de comptes-rendus.	38.05		
Les souscriptions volontaires.	2,508	»	9,172.05
Total à recouvrer.			10,685.40
Les versements effectués pendant le semestre se sont élevés à			5,767.05
Il reste dû, par conséquent, à la date du 18 juin 1852. . .			4,918.35

Dépenses faites.

Les dépenses ci-après ont été faites pendant le semestre :	f.
Deux termes de loyer.	900 »
Contributions à valoir.	70 »
Assurances contre l'incendie.	24.30
Appointements de l'archiviste.	750 »
Gages du concierge chargé de l'entretien.	100 »
Factures de M. Guiraudet, imprimeur, pour comptes-rendus	1,452.50
Factures de M. Chaix, imprimeur :	
1° Pour solde de 1851.	1,333.65
2° Pour bulletins des séances	169.40
Facture de M. Lemaire, graveur.	505.20
Note du serrurier pour installation.	20 »
Affranchissements des bulletins, comptes-rendus, circulaires, etc.	233.65
Ports et affranchissements de lettres.	24.15
Ports de livres et bulletins offerts à la Société.	24.10
Frais de voitures pour distributions de comptes-rendus. . .	41.65
Dépenses de chauffage.	48.50
Dépenses d'éclairage	37.35
Fournitures de bureau, frais divers.	10.15
Total des dépenses.	5,744.60

Situation de la caisse.

Il restait en caisse à la date du 26 décembre 1851.	1,640.75
Recettes du semestre.	5,767.05
Ensemble.	7,407.80
Total des dépenses.	5,744.60
Il reste en caisse le 18 juin 1852.	1,662.20

Souscription volontaire.

La souscription volontaire ouverte à la fin de 1851 a donné les résultats suivants :

Il a été versé par 23 membres du bureau et du comité. . .	3,120 »
Id. par 17 sociétaires.	613 »
Ensemble.	3,733 »

Dont 1,225 f. avant le 26 décembre 1851,
et 2,508 f. pendant le 1er semestre de 1852.

Total égal 3,733 f.

SÉANCE DU 2 JUILLET 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

Il est donné lecture de deux Mémoires de M. E. Jullien, membre de la Société, ingénieur des forges de Montataire, ayant pour titres, le premier : *Explication de la trempe*; le deuxième : *Démonstration pratique que tous les carbures de fer sont des dissolutions.*

Ces deux mémoires, qui avaient été renvoyés à la section de métallurgie, ayant laissé quelques points obscurs dans l'esprit des membres chargés de faire le rapport, il a été décidé qu'on prierait M. Jullien de vouloir bien assister à une séance et y donner toutes les explications nécessaires.

L'ordre du jour appelle la suite de la discussion sur la construction des ponts en tôle et des ponts en fonte.

On fait observer que, dans la dernière séance, M. Lavalley avait cherché à prouver que, dans le pont en tôle, l'emploi de poutres verticales présentait les avantages de la fonte employée en arches; qu'en outre, dans ce système, on remplissait les tympans, et qu'ainsi on employait la tôle dans les conditions d'économie et de solidité égales à celles de la fonte.

UN MEMBRE revient sur la manière dont on a établi la comparaison entre le coût du pont sur le canal Saint-Denis, soit en fonte, soit en tôle. Il ne la croit pas juste. Il faut au moins placer les deux systèmes dans les mêmes conditions, et dans ce cas on trouve :

Pour le pont en fonte :

Fonte 131,600 k. à 0f35	46,060f
Parapets, 66 m. à 20 fr.	1,320
Charpente.	5,600
Échafaudage	8,500
Peinture	900
	62,380

Pour le pont en tôle :

Tôle, 75,000 k. à 0f80	60,000
Charpente.	5,600
Peinture	3,400
	69,000

Les quantités et le prix par mètre courant seraient :

Fonte.	4,000 k.	à 0f35	— 1,435f
Tôle	2,340 k.	à 0,70	— 1,638

Ou bien totalité, par mètre courant :

Pour la fonte	1,948
Pour la tôle	2,159

UN MEMBRE fait observer que l'on vient de prendre pour base d'appréciation des chiffres qui ne peuvent plus être appliqués aujourd'hui ; que ce chiffre de 0f80 pour la tôle est trop élevé.

UN MEMBRE fait observer que M. E. Martin a fait des ponts sur la Loire à 32 fr. les 0/0 kil. tout posés.

On répond que les prix appliqués sont précisément ceux qui servent de comparaison dans le mémoire.

On ajoute qu'en 1844, quand on construisait le pont sur le canal, la fonte qui a été employée dans ces deux constructions a été fournie par l'usine de Maubeuge à 0f30 le kil., ajustage et frais de modèle compris ; les pièces étaient peu lourdes et variées ; aujourd'hui on aurait de la fonte au dessous de ce prix.

CE MEMBRE établit ainsi qu'il suit le coût du pont de Clichy, soit en fonte ou en tôle, suivant le nombre de voies :

Pont en fonte :

2 voies. . .	65,000k	à 0f35	22,855f
3 —	97,000	—	33,950
4 —	130,000	—	45,500

Pont en tôle.

2 voies. . .	35,250k	à 0f,70	24,675f
3 —	44,000	—	32,800
4 —	51,000	—	36,000

L'avantage est en faveur du pont en tôle seulement pour 4 voies ; pour 3 voies la différence est peu sensible. On remarquera que dans la première partie du mémoire pour les 3 voies, l'avantage est de 3,000 fr. pour la fonte sur la tôle.

Si le pont de Clichy avait été droit, avec 20 mètres d'ouverture, il n'aurait pu, dans aucun cas, lutter contre la fonte ; l'avantage qu'il présente à 4 voies est exceptionnel ; cela tient à sa grande obliquité, qui fait que la moitié de sa surface repose sur 10 pièces de pont qui portent sur la maçonnerie en n'ayant que 8 mètres de portée.

Il cite ensuite trois exemples de ponts en fonte :

1° Le pont de Montereau (chemin de fer de Troyes) ;

2° Les ponts de Savonnerie et de Sermaise, près de Bar (chemin d fer de Strasbourg).

Le 1er a	24 m.	d'ouv.	4,000 k.	par mètre à	0f38.	1,520f
Le 2e	14,40	—	2,500	—	—	950
Le 3e	10,08	—	1,800	—	—	684

UN MEMBRE fait observer qu'avant de connaître le prix de revient des deux systèmes, il est bon d'examiner la question d'art et de rechercher dans chacun d'eux le minimum de métal qu'on peut y faire entrer avec le maximum de résistance.

Dans les opinions qu'il a émises sur la construction des ponts en tôle, M. Lavalley a dit que l'on avait, dans un pont en tôle travaillant à 5 kil., la même résistance, la même sécurité, que dans un pont en fonte où le métal travaille à 2 kil.

Mais on peut également faire monter le coefficient pour la fonte en détruisant les oscillations des arcs par un système qui donnera aux longerons, aux tympans et aux arcs, toute la solidité et la rigidité nécessaires.

La question se trouve être, pour la fonte, celle-ci : Ne peut-on pas construire des ponts en fonte assez rigides pour élever le coefficient de travail?

UN MEMBRE dit que si l'on ne passe pas 2 kil. pour le coefficient de la fonte, c'est que, dans un pont en arc de cercle, l'arc entier ne travaille pas seulement à la compression, mais qu'il travaille alternativement à la traction et à la compression au moment où la surcharge s'engage sur le pont et au moment où elle le quitte.

UN AUTRE MEMBRE fait observer que ce fait est vrai dans les ponts où il n'y a pas une solidarité parfaite entre les longerons, les tympans et l'arc, comme dans le pont Polonceau. On peut arriver à des ponts en fonte plus légers, plus résistants et plus solides que les ponts du système Polonceau ; aussi la base de comparaison prise par M. Lavalley pour établir le prix de revient du pont en fonte et du pont en tôle manque-t-elle, sous ce rapport, d'exactitude absolue.

M. LAVALLEY répond qu'il n'a pas pris le pont Polonceau comme point de comparaison au point de vue de sa construction, mais au point de vue de son poids seul, parce que c'est le pont en fonte le plus léger qui ait été construit sur les chemins de fer; que tous les ponts en fonte à voussoirs sont plus lourds.

UN MEMBRE revient sur ce point, que les ponts Polonceau manquent de rigidité, de liaison dans leurs diverses parties.

La réunion des longerons et des arcs par l'intermédiaire d'anneaux qui ne se touchent qu'en un point, a l'inconvénient d'accumuler le travail en ces points; lors du passage de la charge, l'intervalle compris entre deux anneaux consécutifs travaille à la traction dans le longeron, et celle de la partie inférieure travaille peu; aussi, pour donner de la rigidité à tout cet ensemble, dans quelques ponts on a rempli les tympans dans l'intervalle de deux anneaux, de façon que l'arc inférieur fût constamment sollicité par la charge.

Le système de pont en fonte le plus rationnel est celui où les tympans sont composés de croisillons réunissant le longeron à l'arc ; c'est, du reste, dans ce système, que sont établis aujourd'hui la plus grande partie des ponts en fonte. Dans les ponts construits chez M. E. Martin, on n'a pas craint de

porter à 5 kil. le coefficient de résistance de la fonte, en employant pour les longerons, comme pour les arcs, la forme d'un T double.

UN MEMBRE, invité par le président à dire ce qu'il sait sur la chute du pont en pierre d'Angers, rappelle que ce pont devait être reconstruit en pierre avec des arches de 20 mètres de portée. Lors de sa chute, les piles étaient fondées, et une arche du côté des culées était presque entièrement cintrée.

On attribue la chute de la voûte au glissement des fondations, qui ont été faites en béton sur 10 mètres de hauteur et encaissées dans une enceinte de pieux qui n'étaient enfoncés dans la vase que de 1^{m}.50 et reposaient ensuite sur un schiste ardoisier.

C'était en partie sur la tête de ces pieux, et en partie sur la pile elle-même, que les cintres qui servaient à supporter la voûte avaient leur point d'appui; la pile ayant cédé sous le poids de la voûte, le cintre a fini par échapper de dessus la retraite qui le recevait, et est tombé en entraînant la voûte.

SÉANCE DU 6 AOUT 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

M. LE PRÉSIDENT rappelle que, lors de l'inauguration du chemin de fer de Strasbourg, M. Vuigner, ingénieur en chef de la voie, et M. Lemoine, ingénieur, ont été nommés, le premier, officier, et l'autre, chevalier de la Légion-d'Honneur; il ajoute que cette haute distinction, si bien méritée par ces deux ingénieurs, est une preuve de la sollicitude du gouvernement pour récompenser les services rendus par les ingénieurs civils, et que ce doit être un encouragement pour ceux qui ont embrassé cette profession.

M. LE PRÉSIDENT donne ensuite communication :

1° De l'envoi fait par M. Tardif d'une notice relative à la chute du pont suspendu d'Angers. Cette notice paraît être plutôt la relation des faits qu'une appréciation technique de l'événement. Cette notice est renvoyée pour être examinée par la section des travaux publics;

2° D'une lettre de M. Engerth, président de la Société des ingénieurs civils d'Autriche, par laquelle il exprime le désir d'entrer en relation avec notre Société, par l'échange de nos comptes-rendus;

3° D'une lettre de M. Courtépée, membre de la Société, sur les richesses minérales dans la régence de Tunis;

4° D'une lettre de M. Love, membre de la Société, par laquelle il propose à la Société de voter à la prochaine séance un paragraphe additionnel aux statuts ainsi conçu :

« Outre les deux classes de sociétaires qui existent déjà, et qui se re-
» crutent par demandes faites suivant la forme indiquée au règlement, il y
» en aurait une troisième de *membres honoraires*.

» Le titre de *membre honoraire* sera offert sur la proposition de six
» membres, et après le vote affirmatif de la Société, à des ingénieurs étran-
» gers de la plus haute distinction et à des savants indigènes et étrangers dont
» les travaux auraient éclairé des points importants de l'art de l'ingénieur.

» Le nombre des membres de cette classe ne pourra jamais dépasser *dix*.

» Le titre ayant été accepté, le récipiendaire aura le droit d'assister à
» toutes les séances, recevra toutes les publications de la Société, et sera
» exempté de toute cotisation. En retour, il devra à la Société un exem-
» plaire de tous les ouvrages qu'il publiera et qui auront trait à l'art de l'in-
» génieur. »

La proposition que fait M. Love a pour but de faire admettre dans la Société M. Hodgkinson, dont les travaux importants sur la résistance des matériaux ont été méconnus en France, et de rendre ainsi un hommage mérité à un homme qui a rendu de grands services à l'industrie.

M. LE PRÉSIDENT apprécie la pensée qui a inspiré la proposition de M. Love. Si une disposition de ce genre existait dans les statuts de la Société, nul doute qu'il n'en pût être fait un meilleur usage; mais il fait observer que les statuts de la Société ne permettent pas de prendre immédiatement en considération la proposition de M. Love; il faut préalablement qu'elle soit délibérée en comité, et ce n'est qu'à l'époque fixée par le règlement qu'elle pourra être discutée en séance publique;

5° D'une lettre de M. David (du Havre) sur une amélioration qu'il a introduite dans les cabestans : elle consiste à faire relever la corde à mesure qu'elle s'enroule, en laissant sous elle la place libre pour chaque nouveau tour.

Il obtient cet effet à l'aide d'une lunette de forme hélicoïdale, qui entoure le tambour du cabestan, et sur laquelle la corde s'appuyant, est relevée à chaque tour de la hauteur correspondante au pas de l'hélice;

6° D'une lettre de M. Meyer, membre de la Société, sur l'emploi de la détente variable dans les machines locomotives, et dans laquelle il donne un tableau comparatif de la dépense de combustible et de la puissance des machines françaises construites par lui avec la détente J.-J. Meyer et les machines étrangères du système Stephenson.

Ces documents ont été relevés sur les chemins de fer de Bavière, où fonctionnent ces machines.

M. MEYER, en adressant à la Société ces documents, demande qu'ils soient examinés dans la section compétente.

UN MEMBRE fait observer que les documents sont insuffisants pour faire une étude comparative complète. Il faudrait que M. Meyer eût l'obligeance d'envoyer les dessins de chaque système de machines qu'il a mis en parallèle.

UN AUTRE MEMBRE partage cette opinion, mais il insiste sur ce point que, dans cette circonstance, la Société n'a pas à se prononcer sur la supériorité de tel ou tel système de locomotive, mais seulement de chercher à reconnaître les bons effets obtenus par divers modes de détente.

Les documents adressés par M. Meyer sont renvoyés à la section des chemins de fer.

7° D'un mémoire de M. E. Jullien, membre de la Société, ayant pour titre : *Cémentation de la fonte dans les oxydes métalliques.*

L'ordre du jour appelle la lecture et les explications sur les mémoires de M. E. Jullien, ses recherches et ses découvertes relatives à la trempe et aux carbures de fer.

La lecture du mémoire de M. Jullien, faite dans une des précédentes séances, avait laissé très incertain dans l'esprit de beaucoup de membres ce que l'auteur entendait par combinaison et dissolution.

Voici comment M. Jullien les définit :

La combinaison incontestable accuse en général les trois propriétés suivantes, savoir :

1° Les propriétés physiques et chimiques du composé diffèrent essentiellement des propriétés physiques et chimiques des composants ;

2° Les composants sont toujours en proportions définies et invariables dans le composé ;

3° Les réactions chimiques ou de la pile sur le composé n'ont d'effet que là seulement où a lieu le contact.

La dissolution incontestable accuse, au contraire, les trois propriétés suivantes, savoir :

1° Les propriétés physiques et chimiques du composé participent de celles de tous les composants ; en d'autres termes, chacun des composants conserve dans le composé toutes ses propriétés physiques et chimiques ;

2° Il y a un maximum de saturation qu'on ne peut dépasser, mais au dessous duquel le composé se forme en toutes proportions et en accusant toujours les mêmes propriétés, seulement à un degré d'intensité proportionnel au degré de saturation ;

3° Les réactions chimiques ou de la pile, en un point quelconque, sur l'un des composants, produisent leur effet sur ce composant dans toute sa masse.

Ainsi, l'état de dissolution ne s'applique pas à l'état liquide seul, il s'applique aux trois états des corps.

Ceci posé, M. Jullien définit la *trempe* de la manière suivante :

A son avis, la tempe n'est qu'un moyen artificiel pour produire la cristallisation du carbone en facilitant l'émission de la chaleur latente.

En effet, prenez une barre d'acier fondu ; chauffez-la au rouge-cerise et étirez-la en tôle fine de moins de 1 millimètre d'épaisseur.

Portez cette tôle, encore chaude, à la cisaille, elle se coupe facilement ; laissez-la refroidir lentement, et, quand elle est froide, portez-la à la cisaille : elle casse comme du verre, et présente dans sa cassure le grain de l'acier trempé et recuit.

Il y a donc eu cristallisation de carbone sans trempe, et cela par refroidissement lent dans l'air, à la température ordinaire.

N'est-on pas en droit de conclure de ce fait, qu'il est toujours une température à laquelle le carbone cristallise, quelle que soit son épaisseur ? Si la température de 10 degrés suffit pour permettre la cristallisation du carbone dans une tôle de 1 millimètre d'épaisseur, ne peut-on admettre que la température de cristallisation naturelle du carbone en dissolution, par refroi-

dissement lent, est en raison inverse de l'épaisseur de l'échantillon d'acier?

Ne constate-t-on pas ce fait tous les hivers, quand le froid prend subitement, que les essieux et les bandages cassent et accusent une texture cristalline?

M. E. Jullien prend les choses à un point de vue plus général; il cherche l'explication de la trempe non seulement dans le fer, mais encore dans le soufre, l'eau, le bronze, etc.

Voici les définitions et les principes sur lesquels repose sa théorie, déduite d'observations :

« Tremper un corps, dit-il, c'est lui faire éprouver en quelques secondes une variation de température que, par les moyens ordinaires, il n'éprouverait qu'en plusieurs minutes. »

Expliquer la trempe, c'est faire connaître les causes des effets extraordinaires qui sont la conséquence de cette opération.

Il ajoute ensuite que l'explication de la trempe dépend tout entière de l'exactitude des deux hypothèses suivantes, savoir :

1° Les composés solides, liquides ou gazeux, dont l'un ou plusieurs des composants se comportent en présence d'une réaction chimique ou de la pile comme des corps en dissolution, sont des dissolutions.

2° Quand un corps atteint la température et la pression auxquelles a lieu d'ordinaire un de ces changements d'état physique, il faut, pour que ce changement d'état ait lieu, que la température et la pression restent stationnaires pendant un certain temps déterminé par la nature du corps.

Après avoir expliqué les principes précédents par divers exemples, il tire les conclusions suivantes :

L'acier est une dissolution de carbone dans le fer cémenté à l'état mou, c'est-à-dire avant fusion de métal.

S'il a été refroidi lentement, le carbone est à l'état mou dans le fer dur.

S'il a été trempé, le carbone est cristallisé.

La fonte blanche est une dissolution de carbonne cristallisé dans le fer liquide.

La fonte grise est un mélange de graphite et de cristaux d'acier au maximum de saturation.

Si elle a été refroidie lentement, le carbone est à l'état mou dans les cristaux d'acier. Si, prise solide à la température rouge-cerise, elle a été trempée, le carbone est cristallisé dans les cristaux d'acier fondu.

La fonte douce (coulée très chaude dans une coquille chaude) est théoriquement une dissolution de carbone mou dans du fer liquide.

M. JULLIEN donne ensuite quelques développements sur ce principe, que tous les *carbures du fer* sont des dissolutions; ainsi il pense que dans les hauts fourneaux la fonte ne se forme qu'après qu'il y a eu formation d'acier fondu. C'est dans le *ventre* que l'acier fondu se fond et commence seulement à se saturer à l'état liquide, c'est-à-dire à devenir fonte; la forme d'un cône droit de gueulard au ventre est motivée par l'augmentation successive du volume de la masse d'acier qui se forme, masse qui se trouve à son maximum de formation quand elle arrive au ventre, où sa fusion lui fait occuper un volume moins considérable; de là la forme conique renversée des étalages avant d'arriver à l'ouvrage.

Passant aux effets de la trempe du fer; M. Jullien dit que l'effet de la trempe est d'absorber la chaleur latente du carbone, effet que l'eau produit d'autant mieux qu'elle a une grande capacité calorifique; dès que cette absorption peut s'effectuer, quel que soit le moyen employé, il y a cristallisation du carbone disséminé dans la masse du fer.

UN MEMBRE ne partage pas cette opinion; il dit que la trempe détermine dans l'acier un changement de forme des molécules par suite de la différence des températures; il ne voit pas que ce principe reconnu soit infirmé par la théorie de M. Jullien. Ce qu'on cherche en pratique, c'est un refroidissement brusque dans l'eau, et à toute nature d'eau on préfère celle qui a déjà servi.

M. JULLIEN pense qu'un refroidissement lent peut remplacer un refroidissement brusque.

Mais dans la trempe il y a deux choses inséparables, dit M. Jullien, il y a la trempe et le recuit.

Quand on chauffe l'acier au rouge-cerise, il se constitue à l'état de cristaux de fer tenant du carbone liquide en dissolution. Si dans cet état on le plonge dans l'eau le carbone de chaque cristal cristallise, et on obtient un corps sans consistance autre que celle résultant de la cohésion des cristaux ferrugineux, cohésion très faible, comme on sait.

Si alors on recuit graduellement ce corps, le calorique circulant tout autour des cristaux avant de les pénétrer à cœur, remet en fusion le carbone répandu à la surface de ces cristaux, d'où résulte, par la trempe à temps, une nouvelle cohésion infiniment plus tenace que la première, le carbone de tous les cristaux se trouvant, dans ce cas, relié par contact en une masse homogène.

La trempe est d'autant plus forte que le recuit est plus faible.

UN MEMBRE pense que le recuit ne serait pas nécessaire si l'ouvrier était assez habile pour arriver du premier coup au degré de trempe qu'il veut obtenir; l'acier ainsi trempé a beaucoup plus de ténacité que l'autre. C'est cette difficulté qui fait qu'on est obligé de refaire une seconde opération.

UN AUTRE MEMBRE fait remarquer qu'on ne recuit pas toutes les pièces que l'on trempe; ainsi, jamais on ne recuit les limes.

SÉANCE DU 20 AOUT.

Présidence de M. EUGÈNE FLACHAT.

L'ordre du jour appelle la suite de la discussion sur les mémoires de M. Jullien.

Dans la dernière séance, M. Jullien a donné une explication de la trempe des carbures de fer, en partant de ce principe :

Les carbures de fer sont des dissolutions.

Il cherche à démontrer par des exemples que les carbures de fer, et, en général, les *fers impurs, sont des dissolutions.*

Il entend par fers impurs les fontes, les aciers et les fers du commerce.

Il cite ensuite les exemples suivants :

1° DU FER MIS EN CONTACT AVEC L'OXYGÈNE.

Quand le fer est en contact avec l'oxygène à une haute température, il donne naissance à deux espèces de produits, qui sont :

1re espèce : les oxydes de fer ou combinaisons ;

2e espèce : les fers brûlés ou dissolutions.

Si vous cémentez ce dernier fer pendant douze heures dans du charbon de bois au rouge-cerise, ou si vous le recuisez pendant vingt-quatre heures dans un bain de laitier, comme l'indique Karsten, ou simplement en vase clos, comme la tôle fine, il redevient à nerf.

La simple évaporation en vase clos (car dans le four dormant le fait n'a pas lieu) a suffi pour faire évaporer la substance qui détruisait la ténacité du fer.

On verra plus loin que la température seule suffit pour évaporer le zinc, l'étain ou le soufre, en dissolution dans le fer.

Or, dans le cas présent, quelle est la substance que contient le fer pour acquérir des propriétés si contraires à celles qu'il possède ordinairement?

D'après M. Jullien, il y a eu dissolution d'oxygène dans le fer. Le fer n'ayant été en contact qu'avec ce gaz et l'azote, et l'azote ne se combinant qu'à l'état naissant, c'est donc l'oxygène qui produit les fers brûlés.

En effet, prenez un barreau de four dormant, c'est-à-dire un barreau restant quelquefois un an au four avant d'être renouvelé, cassez-le ; vous obtenez deux parties dans la cassure : 1° une enveloppe de deutoxyde de fer, ayant jusqu'à un centimètre d'épaisseur du côté du feu ; 2° à l'intérieur, un fer brûlé.

Il y a donc d'abord dissolution de l'oxygène dans le métal avant qu'il y ait combinaison.

2° DU FER MIS EN CONTACT AVEC L'ÉTAIN.

Ce fer, dont la cassure et les propriétés sont identiques, on peut dire, avec celles du fer brûlé, s'en distingue en ce que, quand on le recuit ou le cémente, il ne change pas de nature, et n'est pas vendable dans le commerce.

Ce fer, chauffé fortement à la forge, dégage des fumées d'acide stanique. L'alliage est incontestable ; seulement, d'après M. Jullien, alliage et dissolution sont synonymes.

3° DU FER MIS EN CONTACT AVEC LE ZINC.

Quand on cémente la fonte dans l'oxyde de zinc, une partie du zinc métallique réduit se dissout dans le fer ou l'acier obtenu et le rend cassant.

Si l'on chauffe fortement le métal, le zinc se volatilise.

Il en est de même du soufre des fers rouverains : le soufre ne s'en va pas complétement, mais il y a dégagement très sensible d'acide sulfureux.

D'après M. Jullien, le sulfure neutre de fer, FS, quelque chauffé qu'il soit, ne pouvant volatiliser du soufre, il en résulte que les fers rouverains sont comme les fers zingués, étamés et oxygénés, des dissolutions.

4° DU FER MIS EN CONTACT AVEC L'ACIER.

Mettez une barre d'acier fondu entre quatre barres de fer à nerf, chauffez le tout au blanc, et étirez en carré ou en rond, vous obtenez une barre de fer fort, parfaitement homogène.

A son avis, si le carbone n'était pas à l'état de dissolution dans les fers, mais à l'état de combinaison, bien certainement il ne se répartirait pas aussi uniformément dans la masse.

5° DES FERS CARBURÉS MIS EN CONTACT AVEC UN OXYDE MÉTALLIQUE QUELCONQUE.

Quand on cémente la fonte, l'acier et même le fer fort, dans un oxyde métallique, on fait disparaître le carbone. La fonte devient acier ou fer; l'acier et le fer fort deviennent fer à nerf.

Ce n'est pas l'oxygène de l'oxyde qui est allé trouver le métal assurément, l'oxyde métallique étant une combinaison décomposable seulement par réaction atomique, c'est-à-dire dans le cas seulement où l'agent décompositeur réagit directement sur chacun de ses atomes composants.

C'est donc le carbone qui s'est rendu de l'intérieur du métal à la surface, et est venu décomposer l'oxyde.

On voit par là une réaction analogue à celle du fer dans la dissolution de sulfate de cuivre, où il suffit d'un point de contact pour que tout le sulfate de cuivre vienne se décomposer sous l'action du fer.

Mettez du fer pur en contact avec de l'oxyde de fer, mélangez-les atomiquement, chauffez fortement, vous ne retirerez de là que du fer et de l'oxyde; tandis que, comme il a été dit plus haut, du fer pur, même en barre, mis en contact avec de l'acier, partage avec lui le carbone dont il est saturé.

Ces deux effets sont distincts et caractéristiques.

M. Jullien termine en citant quelques faits de la métallurgie du fer.

Le recuit de la tôle au four dormant avec refroidissement lent a pour but, tout en détruisant l'effet de l'écrouissage, d'empêcher le carbone, qui existe toujours dans le fer, de cristalliser et de rendre les tôles cassantes.

Le recuit des tôles fines en vase clos a pour but, tout en produisant les mêmes effets que le four dormant, de les préserver de l'action oxydante de l'oxygène, et, en outre, d'évaporer l'oxygène, qu'elles tiennent toujours plus ou moins en dissolution, par suite du passage des platines au four à souder.

Les cloches ne sont autre chose que le résultat de la réaction du carbone en dissolution sur l'oxyde en suspension, tant dans la tôle que dans l'acier de cémentation.

Le grand vice de l'affinage de la fonte par fusion du métal est, tout en ne le décarburant pas complétement, d'introduire dans le métal de la paille d'oxyde, qu'une seconde fusion seule peut faire complétement partir.

De là l'origine de la fabrication de l'acier fondu.

On voit par là que, par le procédé actuel de la fabrication du fer, on ne peut arriver à obtenir du fer parfaitement homogène qu'en cémentant de l'acier fondu dans un oxyde métallique.

Les fers à grains, fers forts, provenant du corroyage de paquets, ne peuvent être homogènes que si les barres qui les composent ont été préalablement décapées, soit mécaniquement, soit par une trempe, à la température rouge, dans l'eau, qui en détache l'oxyde.

En effet, s'il existe de l'oxyde de fer entre les barres composant un lopin de fer fort, cet oxyde réagit sur le carbone de la surface en contact, et convertit en nerf le grain, qui n'était dû qu'à la présence du carbone.

La cassure accuse alors autant de lignes de nerfs qu'il y a de soudures, et bien souvent les soudures elles-mêmes sont mal faites, parce que l'oxyde, très peu fusible, est resté intercallé entre les barres.

La décarburation, dans ce cas, est d'autant plus considérable qu'il y a plus d'oxyde entre les barres.

Après la communication de M. Jullien, un membre dépose sur le bureau des échantillons de blendes, et demande si, parmi les membres de la Société, quelques-uns ont eu à s'occuper du traitement des blendes par le bois.

UN MEMBRE répond qu'il s'est occupé de cette exploitation, et qu'il a employé le bois de sapin ; mais il fallait qu'il fût préalablement desséché.

On ajoute que le grillage des blendes est aussi une des opérations capitales du traitement du minerai ; on emploie un procédé qui consiste à faire ce grillage avec de la vapeur d'eau et à l'abri du contact de l'air ; que, de cette façon, on enlève facilement le soufre : ce procédé est très simple et très efficace.

UN MEMBRE dit qu'il a obtenu par ce procédé de bons résultats : il a obtenu 40 à 42 0/0 de zinc ; mais il faut que les fours aient une forme particulière ; il faut des foyers plus courts que ceux qu'on fait habituellement ; il faut aussi du bois essentiellement sec, autrement on n'obtient pas la température nécessaire à la réduction du minerai.

M. PETITGAND donne ensuite communication d'une note sur les produits réfractaires.

Il est rare, dit-il, de ne pas trouver autour de soi les terres nécessaires pour ses compositions, et, par des mélanges convenables, on arrive toujours à constituer de bonnes matières ; mais, selon lui, le point important de la fabrication est la dessiccation ; il faut qu'elle soit lente et graduée ; il faut que la terre ait vieilli ; c'est à cette condition que les briques et creusets durent long-temps au feu.

La dessiccation étant le point important de la fabrication des produits réfractaires, M. Petitgand donne dans son mémoire la description des modes de dessiccation naturelle et artificielle, et des appareils employés.

Après les appareils de dessiccation, il termine par l'énumération et la description des fours destinés à la cuisson.

UN MEMBRE pense qu'on peut toujours obtenir des produits réfractaires

par la cuisson et par des mélanges de terres ordinaires ; ainsi, en prenant de la terre, la soumettant à la cuisson, la pulvérisant, ajoutant encore un tiers de terre neuve et mélangeant, on doit arriver à avoir des produits réfractaires.

M. PETITGAND partage cette opinion ; mais il fait observer que ces cuissons répétées sont dispendieuses ; il est certain, du reste, que plus on recuit une terre, plus on y développe l'élément siliceux : aussi les briques les plus vieilles sont celles qui donnent les meilleurs produits réfractaires ; les cuissons diminuent aussi les tendances au retrait.

M. Petitgand cite cependant un exemple de schiste qu'on trouve près de Carthagène, en Espagne, où ce principe ne se vérifie pas. Du reste, il faut, en quelque sorte, une nature de terre spéciale à chaque destination. Ainsi, les terres bonnes pour certains fours ne le sont pas pour d'autres ; c'est une étude spéciale et locale à faire.

UN MEMBRE, qui partage cette opinion, dit que toute usine un peu importante a intérêt à fabriquer elle-même ses produits réfractaires ; elle y emploie ses déchets, et arrive ainsi à un prix de revient très bas et à des produits excellents.

SÉANCE DU 3 SEPTEMBRE 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

L'ordre du jour appelle la lecture d'un extrait, par M. Lorentz, de deux mémoires lus à l'Institut des ingénieurs civils de Londres, et relatifs tous deux à l'exploitation des chemins de fer.

Le premier de ces mémoires est du capitaine Marck Huish, et traite des accidents.

L'auteur fait remarquer que, s'il est vrai que la bonne construction et le bon état de la voie soient la base fondamentale de toute sécurité, s'il est nécessaire de ne se jamais départir, à son égard, d'une stricte surveillance, indispensable surtout lors d'un brusque changement de temps, alors que les points faibles d'une voie se trahissent pour ainsi dire d'eux-mêmes, encore faut-il reconnaître que c'est de la voie que provient le moins grand nombre d'accidents.

Il est bien rare que les trains déraillent et, alors, c'est généralement, non pas à la négligence qu'il faut l'attribuer, mais à des obstacles placés à dessein sur la voie. Ces attentats prennent les formes les plus variées et les plus ingénieuses, et l'on ne saurait se faire une idée de leur fréquence. La pénalité attachée à leur répression a été récemment aggravée, et l'on espère que le nombre en diminuera. — Le rapide développement du trafic et particuliè-

rement de celui des marchandises pesantes, a conduit, sur les lignes artérielles de l'Angleterre, à l'établissement de nombreuses voies accessoires et de dégagements; le *London and North-Western* a posé ainsi, depuis un petit nombre d'années, plus de 85 kilomètres de voies nouvelles; nécessité qui, en multipliant les croisements et les aiguilles, multiplie dans la même proportion les chances d'accidents; il est reconnu comme axiome que tout ce qui rompt la continuité des rails est un danger. C'est à de judicieux règlements, combinés avec un bon système de signaux, qu'il appartient de contrebalancer ces inconvénients. Il est juste, toutefois, de remarquer que, depuis que l'on a réduit le nombre des aiguilles placées à *contre-marche*, le danger a diminué. La confiance que l'on a accordée aux aiguilles *self-acting* n'a pas peu contribué aussi à produire des accidents. Règle générale: il est peu sûr de charger la machinerie du soin des manœuvres et de la surveillance (1).

Passons maintenant au matériel roulant. — Sur mille accidents arrivés aux machines-locomotives sur le *London and North-Western*, les ruptures et fuites de tubes figurent en quantité plus que double de tout autre accident; ajoutées aux ruptures de ressorts et soupapes, elles constituent le tiers du nombre total des accidents de machines, et, quoique n'offrant pas de danger direct, encore peuvent-elles amener, indirectement, des collisions de trains. L'excellente construction des voitures à voyageurs les exempte, on le peut dire, de tout accident. Dans les quatre dernières années, l'énorme matériel du *London and North-Western* n'a eu à enregistrer que la rupture de quatre roues en fer et de deux roues en bois. Originairement, il arrivait assez fréquemment que les essieux *chauffassent*; mais le nombre de ces accidents a été notablement réduit par l'emploi des boîtes à graisse perfectionnées. Les wagons à marchandises ne méritent point le même éloge; c'est, de toutes les parties du matériel, la moins améliorée; les ruptures d'essieux y sont fréquentes; en outre, leur destruction est singulièrement activée par le mode d'attache, qui est très défectueux, et par l'usage de tampons sans ressort et qui ne concordent pas en hauteur ni en diamètre.

Il n'y a pas d'exemple de mort provenant d'incendie, soit spontané, soit dû à quelque débris de coke enflammé; mais il y a eu de fréquentes alertes. Ce danger, et d'autres encore, ont fait imaginer divers moyens de communication entre les voyageurs, le conducteur du train et le conducteur-mécanicien, tous fondés à peu près sur le même principe, à savoir: l'établissement d'une corde ou d'un long fil métallique; mais la pratique a condamné ce système. Une autre solution plus praticable, mieux accueillie, patronnée même par les commissaires des chemins de fer, consiste dans le prolongement des marchepieds, de telle sorte qu'ils forment une étroite plate-forme régnant d'un bout à l'autre du train; mais cette mesure à fini, à son tour, par être unanimement condamnée par un comité de chemins de fer. La méthode actuellement en vigueur sur le *London and North-Western* consiste

(1) Il serait plus exact de dire qu'en règle générale les machines sont plus sûres que l'œil et le bras humains, sujets à tant d'inexactitude et d'irrégularité; l'exclusion qu'appelle le capitaine Marck Huish ne devrait s'adresser qu'exceptionnellement à des appareils insuffisamment conçus ou peu perfectionnés.

à faire saillir la guérite du conducteur de train de 30 centimètres, environ, en dehors des autres voitures ; placé à l'extrémité du train, le conducteur peut ainsi apercevoir les signes faits avec la main ou un mouchoir ; mais ce moyen ne peut servir la nuit.

Les diverses sources des accidents qui viennent d'être énumérés ne forment pas la dixième partie de ceux qui n'ont d'autre cause que des infractions aux règlements et de l'inattention aux signaux. Dans ces derniers temps, les signaux fixes des stations ont reçu de notables améliorations et l'adoption de grands *sémaphores*, aidés de signaux auxiliaires, ne laisse que peu à désirer ; à quoi il faut ajouter les signaux à la main, applicables aux arrêts entre stations, et les signaux fulminants ou détonants, qui pourvoient parfaitement aux éventualités du brouillard. — Quant au télégraphe électrique, il a singulièrement facilité l'exploitation en mode anormal ou variable; tellement, qu'en 1851, sur 7,900,000 voyageurs (soit environ le tiers de la population de l'Angleterre) qu'a convoyés le *London and North-Western*, un seul a trouvé la mort, et cela par suite d'une grave infraction au règlement ; pendant les six mois qu'a duré l'Exposition universelle, 775,000 voyageurs, dans 24,000 voitures, ont été remorqués par des trains de plaisir, tous convergeant vers un point central unique, arrivant à des heures irrégulières, déversés par plus de trente embranchements différents, et l'on n'a pas eu à noter le moindre accident, quoique l'on n'ait pas un instant interrompu l'énorme service ordinaire de cette grande artère. C'est, du reste, à tort que l'on s'effraie de l'irrégularité des trains ; avec une bonne discipline et de bons signaux, l'irrégularité dans les départs n'offre aucun danger; on peut même dire que l'incertitude qui en résulte surexcite la vigilance du personnel et le tient en éveil pour le plus grand avantage de la sûreté.

En résumé, les statistiques des chemins de fer et les documents administratifs donnent, en les signalant périodiquement au public, une importance peu réelle aux accidents de chemins de fer. Si l'on relevait de même les accidents des steamers, des mines, des omnibus et même des piétons, on demeurerait convaincu que les chemins de fer, à part tous leurs autres avantages, offrent celui d'un mode de voyage plus sûr que pas un des autres systèmes passés ou présents de locomotion.

Le second des mémoires dont nous donnons l'extrait est de M. Braithwraite-Poole, et traite des avantages économiques réalisés par les chemins de fer, ainsi que des améliorations que l'on pourrait apporter dans leur exploitation.

Le trafic des voyageurs dépasse annuellement, sur les chemins de fer de la Grande-Bretagne, quatre fois la population entière de ce pays ; il se fait à une vitesse de trois fois celle des anciennes diligences et des malles, et à des tarifs d'un tiers de ceux de ces véhicules ; tandis que le prix du transport des marchandises, minerais et produits agricoles, y est de 50 0/0 moindre qu'il n'était il y a quinze ans sur les canaux et les routes à barrières.

Les tarifs ordinaires sont, par voyageur, de 0f.03 à 0f.19 par kilomètre; et, par tonne de marchandises, de 0f.06 à 0f.39.

Sans les chemins de fer, jamais on n'eût pu accomplir la grande réforme du tarif postal ; jamais on n'eût pu mettre l'Exposition universelle à la portée

des masses ; les consommations de toute nature seraient restées à peu près stationnaires, et les foyers des pauvres habitants de la campagne ne seraient point chauffés par le charbon.

Diverses modifications pourraient être introduites dans l'exploitation, dans le but d'en diminuer la dépense. On peut citer, en premier lieu, la fusion des diverses lignes en quatre grands groupes, fusion qui assurerait l'unité dans la direction, dans l'entretien de la voie et du matériel, et même dans la construction de ce dernier. Il serait également utile, dans l'intérêt de tous, de faire, autant que possible, complète séparation des classes de voyageurs, remorquant chacune d'elles à des vitesses différentes. Il n'est pas juste que les voyageurs qui paient les tarifs les plus élevés voient arriver en même temps qu'eux les voyageurs de troisième classe.

Dans la discussion qui a suivi la lecture des deux mémoires, on a reconnu qu'il était à souhaiter, en effet, que les axes des tampons correspondissent entre eux ; mais l'idée d'imposer au matériel une complète et générale uniformité a été vivement repoussée.

On a également combattu, comme impolitique et impraticable, l'idée de diviser le royaume en quatre groupes et de fusionner le matériel dans chacune de ces zones.

Une autre question a été soulevée dans la discussion, celle de savoir s'il était avantageux ou non, pour les compagnies, de fabriquer elles-mêmes leurs machines et leurs wagons, et même, comme on en a eu l'idée, leurs propres rails. De nombreux exemples ont été produits pour prouver que les compagnies ne peuvent fabriquer aussi économiquement que les ateliers des particuliers. Un grand et excellent constructeur de locomotives a subi des pertes considérables depuis 1848 ; que n'eût pas perdu, dans de semblables circonstances, une compagnie incapable de déployer, pour la conduite d'un semblable travail, l'énergie, les soins et l'esprit de suite d'un constructeur particulier !

Cependant quelques personnes ont été d'avis que lorsqu'une compagnie exécute elle-même son entretien, il peut être économique pour elle d'utiliser ses outils, et le temps disponible de ses travailleurs, à la construction d'un matériel neuf.

On a admis que l'entretien de la voie, la fabrication du gaz et un petit nombre d'autres travaux pouvaient, à juste titre, être directement régis par les compagnies ; d'autre part, on a avancé qu'il était de leur intérêt de se décharger, sur des entrepreneurs, de la traction et de l'entretien du matériel ; il devient possible, ainsi, d'arrêter le compte capital, et les actionnaires peuvent voir clair dans leur position.

M. JULLIEN donne ensuite une analyse de son troisième mémoire intitulé : *De la cémentation de la fonte dans les oxydes métalliques.* Il fait remarquer que du moment où les carbures de fer sont des dissolutions, il n'est pas nécessaire, pour en retirer les corps étrangers qu'ils contiennent, de les traiter atomiquement comme des combinaisons ; en d'autres termes, il n'est pas nécessaire, pour convertir la fonte soit en acier, soit en fer, de la mettre en fusion mélangée avec des oxydes métalliques ; il suffit seulement de la mettre en contact extérieur, à une température convenable, avec les réactifs capables d'attirer au dehors les composants de la dissolution.

Or, en ce qui concerne le carbone, c'est-à-dire le principal composant

de la dissolution, les oxydes métalliques sont le réactif par excellence pour attirer ce corps à la surface de la fonte.

Considérant donc les fontes comme des dissolutions ferrugineuses de carbone parfaitement pures, sauf à tenir compte plus tard des autres matières étrangères qu'elles contiennent, la fabrication de l'*acier*, du *fer* en *barres* et des *tôles* se réduit à une *cémentation de la fonte dans un oxyde métallique sans fusion et à un étirage sans corroyage.*

M. Jullien rend alors compte des effets de la cémentation de la fonte en barres plates dans les oxydes métalliques, suivant que les barres sont :

1° Isolées dans l'oxyde métallique :

2° Contiguës entre deux lits d'oxyde;

3° Isolées sur un lit d'oxyde seulement;

4° Situées entre un lit d'oxyde d'une part, et une tôle de fer, du charbon de bois ou de la terre cuite, d'autre part ;

5° Contiguës et accouplées deux à deux entre deux lits d'oxyde;

6° Accouplées deux à deux et isolées au milieu de l'oxyde.

M. JULLIEN présente ensuite à la Société divers échantillons d'acier en barres étirés au laminoir ou étirés au marteau en *burins* ou *forets*, ainsi que des tôles fines fabriquées par ce procédé.

Il considère la fabrication du fer, et surtout celle de l'acier, comme plus économique par ce procédé que par l'autre, attendu que :

1° Il n'y a pas de corroyage, c'est-à-dire de doublage et soudage, par conséquent pas de déchet;

2° Les oxydes métalliques sont peu coûteux, et il en faut une faible proportion pour opérer la décarburation;

3° Le chauffage des caisses à cémenter peut avoir lieu par la chaleur perdue des fours dormants, servant au chauffage des platines cémentées, soit pour le laminage en tôles fines, soit pour le laminage en barres.

L'acier, par ce procédé, doit coûter moins cher au fabricant que le fer produit de la même manière et avec la même fonte, attendu que la durée de la cémentation, pour obtenir du fer, est double de celle nécessaire pour obtenir de l'acier.

M. JULLIEN termine en exposant une théorie des effets chimiques extraordinaires qui se manifestent pendant la cémentation, ainsi que des phénomènes naturels, non encore expliqués, qui lui paraissent devoir se rattacher au même principe que la décarburation de la fonte par cémentation dans les oxydes métalliques.

SÉANCE DU 17 SEPTEMBRE 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

L'ordre du jour appelle la lecture d'une note de M. Jules Poirée (ingénieur des ponts et chaussées), sur la résistance à la traction des wagons à freins.

Ces expériences ont été faites au chemin de fer de Lyon, et ont eu pour but de mesurer la résistance à la traction des wagons lorsqu'on serre les freins, c'est-à-dire, quand le frottement de roulement est transformé en frottement de glissement.

UN MEMBRE fait observer que les expériences de M. J. Poirée auraient un caractère plus concluant si elles avaient été faites les roues marchant, parce que, dans ce cas, il ne se forme pas de plats comme quand les roues sont entièrement arrêtées.

M. POIRÉE répond que, dans la première série des expériences, les roues étaient complétement arrêtées ; mais que, dans la seconde, elles pouvaient encore tourner, et que cependant les résultats ont été les mêmes dans les deux cas. Il y a un fait remarquable, c'est que, dans une expérience de 1,600 mètres, l'effort de traction mesuré au dynamomètre n'a pas varié.

UN MEMBRE regarde ces expériences comme tout à fait concluantes ; il en résulte que, quand la vitesse diminue, l'action des freins est plus énergique qu'au commencement de leur action ; c'est ce qu'il a souvent remarqué, dit-il, dans l'arrêt d'un train.

Dans ces circonstances, les lois sur le frottement sont bouleversées, et alors les frottements ne sont plus indépendants, ni des surfaces, ni des vitesses. Comme le dit la théorie, il y a dans le fait de l'arrêt une pénétration, un arrachement de molécules qui changent les conditions normales.

UN AUTRE MEMBRE ne partage pas cette opinion ; il a remarqué qu'à l'origine des chemins de fer, quand les wagons ne portaient pas de tampons de choc, qu'on fermait le régulateur de la machine, et qu'on serrait le frein du tender, à ce moment même il résultait du ralentissement un choc des wagons les uns sur les autres, choc très violent quand les trains étaient considérables. L'action du frottement de l'arrêt se faisait donc immédiatement sentir, si bien que, pour éviter ces chocs, les ordres étaient donnés pour arrêter les freins des wagons avant de fermer le régulateur et de serrer le frein du tender.

Si aujourd'hui, où tous les wagons sont munis de ressorts de choc, on ne s'aperçoit pas immédiatement de l'effet des freins, il ne faut l'attribuer qu'à la quantité de mouvement que les trains possèdent et qui ne peut être annulée que progressivement.

M. LE CHATELIER trouve les expériences de M. J. Poirée également concluantes ; elles s'accordent avec les faits qu'il a observés. Cependant, il croit que l'action du frottement développée par les freins est plus intense à la fin qu'au commencement de son action. Il serait à désirer que M. Poirée fît une expérience de l'effort de traction sur un train de marchandises de 25 wagons, par exemple, en plaçant le wagon frein à l'arrière, et le dyanomètre entre ce wagon et celui qui le précède. Il serait intéressant de voir dans ces conditions les variations de la courbe représentative des efforts de traction.

Il fait observer que, dans ces expériences, M. Poirée n'a pas défalqué de l'effort de traction due au frottement seul la résistance du vent qui varie avec la vitesse. Cette défalcation diminuerait encore le chiffre représentatif de la valeur du frottement.

UN MEMBRE pense que le choc qu'on éprouve quand on ferme le régula-

teur tient plus à la résistance qu'oppose la machine elle-même, qu'il ne tient à l'arrêt des wagons.

UN AUTRE MEMBRE répond que, dans son observation ci-dessus, il n'a voulu établir que ce point, sur lequel il n'a pas le moindre doute, c'est que le frottement développé au commencement de l'action des freins est le même que celui qui agit à la fin.

On combat l'opinion émise par M. Poirée, que l'intensité des chocs augmente avec la vitesse ; l'inverse se fait cependant sentir aux arrêts où à mesure que le train se ralentit le passage sur les joints des rails est tel qu'on peut les compter ; ceci n'arrive pas quand les trains sont en vitesse.

M. LE CHATELIER explique, par les chocs des roues sur les rails, le mouvement que les rails tendent à prendre ; il résulte en effet de ce choc, qui a toujours lieu à chaque joint sur le rail d'avant, une pression oblique qui se décompose en deux, verticale et horizontale, et c'est celle-ci qui imprimerait au rail son mouvement de translation, mouvement qui est facilité par le plus ou moins grand relâchement des coins.

On répond à cette opinion par ce fait : c'est qu'au chemin de Saint-Etienne les rails des deux voies marchent dans le même sens.

M. MOLINOS donne ensuite communication d'une note sur le monte-charge hydraulique établi par M. Eug. Flachat au chemin de fer de l'Ouest.

SÉANCE DU 1er OCTOBRE 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

M. LE GÉNÉRAL MORIN demande à faire quelques observations sur les résultats des expériences de M. Poirée, relatives à la résistance à la traction des wagons à frein. Il n'a rien à objecter aux *résultats*, mais il désire appeler l'attention sur les *circonstances* de ces expériences.

On peut dire, en général, qu'il est bien peu de lois de physique mécanique qui restent vraies et exactes lorsque l'on ne se trouve plus dans les conditions qui ont servi à les établir. — Ainsi, de nombreuses expériences *ont* prouvé que la résistance de l'air était proportionnelle au carré de la vitesse. Cela est certainement vrai pour un mouvement uniforme ; mais la loi ne se vérifie plus lorsqu'il s'agit d'un mouvement variable ; il faut alors y introduire un terme nouveau, proportionnel au rapport de l'accroissement de la vitesse à l'élément accélérateur ; dans la loi du mouvement des projectiles dans l'air, il faut introduire un terme proportionnel au cube de la vitesse. — Ainsi, la proportionnalité de la résistance de l'eau au carré de la vitesse a été vérifiée, au moyen de projectiles lancés dans l'eau, jusqu'à 500 mètres de vitesse ; cette loi se vérifie aussi pour le mouvement des bateaux dans les canaux, jusque $3^{m}.50$ à 5 m. de vitesse, quand le bateau reste horizontal et

quand l'onde est à peu près vers le milieu du bateau ; mais il n'en est plus de même aussitôt qu'il survient une perturbation dans la position de l'onde par rapport à la longueur du bateau. — Ainsi, la résistance des roues à palettes planes est proportionnelle au carré de la vitesse ; cependant, si l'on vient à dépasser certaine vitesse, la loi ne se vérifie plus ; il arrive même que la résistance diminue quand la vitesse augmente ; c'est qu'alors intervient un nouvel élément, le temps ; la roue finit, pour ainsi dire, par tourner dans l'air, le temps manquant pour combler le vide que fait la palette.

Abordant ensuite la question du frottement, M. le général Morin rappelle que déjà, précédemment, un grand nombre de faits avaient prouvé ce que confirment les expériences de M. Poirée, à savoir, que dans certaines circonstances le frottement diminuait avec la vitesse. — Ainsi, M. Morin a trouvé que dans le cas de frottement de surfaces qui se compriment, telles que chêne sur orme (par exemple), la résistance était, au départ, de. . . . . 324 kil. 82

En mouvement de. . . 185 »

Différence. . . 139 »

De même, pour des corps enduits, restés quelque temps en contact, les surfaces sont à l'état *onctueux ;* mais lorsque le mouvement a lieu, ces surfaces deviennent parfaitement graissées, et le frottement diminue à mesure que les corps prennent de la vitesse.

Il en est encore de même pour la pulvérisation de la poudre : la résistance diminue quand la vitesse du travail augmente ; c'est que ce dernier se fait au moyen de billes en bronze renfermées dans des tonnes, et que, lorsqu'on fonctionne avec vitesse, ces billes restent appliquées le long de la circonférence du cylindre, au lieu de retomber pour être ensuite relevées. — Les obus à balles, lorsqu'on opère avec une force d'impulsion considérable, offrent encore un exemple frappant : ils ne lancent plus qu'une seule masse de plomb ; les balles font corps.

Il doit y avoir et il y a quelque chose d'analogue pour les trains de chemins de fer. A grande vitesse, il y a moindre résistance de la part des wagons à freins, parce que les mouvements vibratoires diminuent, et qu'il y a par conséquent moins de travail moteur de consommé.

M. POIRÉE fait observer qu'en effet, quand les ressorts étaient calés, le wagon sur lequel il expérimentait se comportait comme un *traîneau.*

M. LE GÉNÉRAL MORIN appelle l'attention sur ce dernier fait, qui lui semble donner la clef de la dérogation apparente que l'on a signalée à la loi du frottement. Ce sont, pour ainsi dire, des causes accidentelles qui venaient s'interposer, à savoir, les oscillations du train, et aussitôt ces causes disparues par l'action d'une grande vitesse d'impulsion, le train agit comme un traîneau, et, chose remarquable, donne alors des résultats à peu près identiques avec ceux qu'on obtient avec un traîneau véritable à petite vitesse.

A la grande vitesse de 20 m., M. Poirée a obtenu le chiffre de 0.132 pour le rapport du tirage au poids remorqué ; or, en expérimentant avec un traîneau (fer sur fer) sur une surface de contact de 3 déc. c. sans enduit, M. Morin a trouvé, il y a long-temps, et pour des vitesses de 3 m. à 3m.50, le chiffre de 0.138.

Il est probable que, si l'on continuait les expériences de M. Poirée à des vitesses de 30 et 40 m., le fait de la diminution de la résistance à mesure que la vitesse augmente ne se confirmerait pas.

Il est évident, pour conclure, qu'opérant avec des corps toujours plus ou moins imparfaits, et dans des conditions et circonstances toujours plus ou moins différentes, les lois absolues ne peuvent point se vérifier complétement et toujours.

UN MEMBRE est d'avis que l'intervention des vibrations peut expliquer, en partie, cette plus grande résistance des wagons à freins, lorsque la vitesse de marche augmente ; cependant il y a dans la série des phénomènes que présente l'action du frein quelques faits dont il faut sans doute chercher la cause ailleurs.

Ainsi, il a observé qu'un wagon dont les essieux étaient directement chargés d'un poids accessoire de 2,000 kil. environ ne donnaient que des vibrations insensibles sous l'action du frein, tandis que les vibrations se faisaient très sensiblement sentir en l'absence de ce poids, plus fortes, il est vrai, au moment d'arrêter qu'en vitesse.

Ayant fait récemment serrer le frein, la machine étant lancée, il a observé que des étincelles jaillissaient à l'instant ; mais que ces étincelles allaient en diminuant constamment jusqu'au moment de l'arrêt des roues. Cet essai a été recommencé plusieurs fois et a toujours donné les mêmes résultats.

Ne serait-ce pas qu'à grande vitesse la décomposition du fer et la fusion des particules enflammées qui sont produites occasionnent une certaine onctuosité et donnent lieu à un certain frottement?

Quoi qu'il en soit, il résulte des expériences de M. Poirée des conséquences intéressantes. Ainsi, personne ne savait que la résistance des wagons à freins pouvait aller jusqu'au quart du poids remorqué. C'est là un fait capable de rassurer les esprits, quant aux difficultés que présente l'arrêt des trains ; il est certain maintenant qu'en étendant l'usage du frein, on peut disposer au besoin d'une puissance plus que suffisante.

UN MEMBRE fait observer qu'outre l'avantage qu'offrent les grandes vitesses de diminuer le frottement, il semble résulter de quelques observations qu'il a faites, il y a plusieurs années, en voyageant sur les chemins de fer anglais, que le *lacet* allait jusqu'à disparaître en certaines circonstances, lorsque l'on marchait à grande vitesse, qui, à cette époque, était de 50 à 60 kilom.

UN AUTRE MEMBRE répond qu'il est prouvé par l'expérience qu'au contraire le lacet augmente avec la vitesse. Des voitures qui ne lacent pas à 40 et à 60 kilom. lacent presque infailliblement à 80 kil.

Selon lui, le lacet est dû principalement au jeu dans les boîtes à graisse, et il augmente avec la vitesse au point de devenir insupportable lorsqu'il n'y a pas de grands écartements.

Revenant à la question du frottement, il pense que l'échauffement des parties en contact ne laisse pas que d'avoir une grande influence ; au frottement proprement dit, vient s'ajouter l'*usé* de la matière.

M. BERTOT est d'avis que l'influence de la vitesse sur le frottement des wagons sur chemins de fer s'explique par ce fait bien connu, qu'il faut un certain temps aux vibrations pour se propager ; le polissage de l'acier n'est

possible que parce que les molécules sont arrachées avant que cette propagation ait eu lieu. Par assimilation, lorsqu'il y a grande vitesse sur un chemin de fer, on doit se trouver dans les mêmes conditions que s'il n'y avait pas vibration.

M. LE GÉNÉRAL PONCELET fait observer que le *ton* d'une corde ne dépend pas de la vitesse de l'archet; on peut dire, en général, que l'intensité des vibrations dépend plutôt de la constitution moléculaire que de la vitesse.

Il faut admettre, car le fait a été surabondamment prouvé, que le frottement est indépendant de la vitesse lorsque l'on reste dans certaines circonstances.

En Angleterre, M. Rennie est arrivé à des formules long-temps admises, et qui auraient pu conduire à des conséquences bien erronées sans les expériences si concluantes de M. Morin; c'est que, pour déterminer ces formules, M. Rennie s'était mis dans des conditions anormales; dans ses essais, les surfaces en contact étaient corrodées.

UN MEMBRE rappelle un fait tout récent qui s'est passé au chemin de fer du Nord; c'est une voiture de pierres qui a été littéralement traversée par une locomotive. Or le conducteur, en apercevant cet obstacle, avait serré son frein; mais le frein n'a pas agi, la vitesse étant trop grande; l'action ne s'en est fait efficacement sentir que lorsque la machine a ralenti.

UN AUTRE MEMBRE répond que le fait cité a été observé depuis long-temps, mais qu'il y a là peut-être plutôt une question de quantité de mouvement que de frottement. Le point capital qui ressort des expériences de M. Poirée, c'est la diminution du frottement à mesure que la vitesse augmente.

UN MEMBRE, répondant aux considérations précédemment émises sur les causes déterminantes du lacet, fait observer qu'il n'est pas exclusivement dû au jeu dans les boîtes à graisse; car il existe des voitures à huit roues, avec du jeu, qui ne lacent nullement. Il pense que le lacet est produit quand les tampons ont perdu leur contact.

UN MEMBRE répond qu'au jeu dans les coussinets viennent s'ajouter un grand nombre de causes, telles que la conicité des roues, le malmontage des essieux, et beaucoup d'autres encore; mais que le motif le plus ordinaire, c'est le jeu des boîtes. Il est rare qu'en changeant les coussinets d'une machine, on n'en voie point cesser le lacet.

UN AUTRE MEMBRE signale ce fait, qu'au chemin de fer du Nord on a augmenté le lacet en augmentant de 1/20 à 1/10 la conicité d'une des paires de roues d'une machine *Crampton*.

SÉANCE DU 15 OCTOBRE 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

UN MEMBRE demande à revenir sur la discussion qu'a soulevée le mémoire de M. J. Poirée. Selon lui, on peut se rendre compte du phénomène

d'une diminution de frottement concordant avec une augmentation de vitesse, par la formule bien connue de $e = f\frac{gt^2}{2}$ laquelle résulte d'une pression P sur le rail qui en éprouve une certaine courbure, et dans laquelle e représente la flèche de cette courbure et f un certain coefficient dépendant de la résistance de la matière du rail. Si t, c'est-à-dire le temps pendant lequel s'exerce l'action, est très petit, e devient lui-même très petit, c'est-à-dire que la tendance du rail à se redresser (ou ses vibrations) devient très faible.

Il est bon de faire observer qu'il faut distinguer la pesanteur de la pression. La pesanteur est une, constante; mais la pression, en vertu de la formule qui vient d'être rappelée, est proportionnelle au carré du temps pendant lequel le corps en mouvement séjourne sur le point comprimé. De là, et de la formule élémentaire $v = \frac{E}{t}$ dans laquelle E représente l'espace parcouru dans le temps t, il résulte que e, et par suite la pression, ainsi que le frottement qui est proportionnel à cette dernière, sont en raison inverse du carré de la vitesse de translation.

UN MEMBRE répond que la formule qui vient d'être établie ne peut suffire à donner la clef des grands écarts que signalent les expériences de M. Poirée, dans la résistance des wagons; ainsi, pour de petites vitesses, cette résistance a varié du simple au double, de 0,11 à 0,25 du poids remorqué; d'autre part, les vitesses extrêmes des expériences de M. Poirée, introduites dans cette formule, donneraient, pour les valeurs correspondantes de e, un écart plus grand que celui qu'on a obtenu expérimentalement. Il y a donc des circonstances accessoires qui sont de beaucoup plus importantes, et ôtent de sa signification à la formule précitée.

UN AUTRE MEMBRE décompose la question de la variation des pressions, relativement à la vitesse, en deux autres.

L'une d'elles, celle de la flexion des rails, étant résolue expérimentalement, rien de plus facile que de résoudre l'autre, c'est-à-dire de déterminer les pressions verticales. S'il s'agit, pour plus de simplicité, d'une roue dont le centre de gravité soit situé sur l'axe de figure et que l'on projette le mouvement sur un axe vertical, on aura, par une formule élémentaire : $M\frac{dv}{dt} = P - R$. M et P désignent la masse et le poids de la roue, R, la réaction exercée par le rail de bas en haut, réaction égale et opposée à la pression qu'il s'agit d'évaluer; $\frac{dv}{dt}$ est l'accroissement de vitesse verticale du centre de gravité de M. D'ailleurs z étant l'ordonnée de M, compté d'un plan fixe horizontal dans le sens de la pesanteur, on a $v = \frac{dz}{dt}$. La quantité $\frac{dv}{dt}$ ou $\frac{d^2z}{dt^2}$ peut être censée obtenue par la voie expérimentale.

Si le mouvement de translation du centre de gravité est horizontal, et que le rail soit supposé rigoureusement inflexible, $\frac{dv}{dt}$ est nul et l'on a $R = P$;

c'est-à-dire que le rail supporte une pression simplement égale au poids du mobile, quelle que soit sa vitesse. Mais si le rail fléchit entre les traverses, l'ordonnée z croît et décroît alternativement, ce qui rend les valeurs de $\frac{dz}{dt}$ ou de v successivement positives et négatives; il en résulte que $\frac{dv}{dt}$ et par suite la valeur de la réaction R, que donne l'équation ci-dessus, sont des quantités variables.

Quant à la question de fixer par la théorie la manière dont la pression R varie avec la vitesse, il y aurait à traiter le problème du mouvement oscillatoire du rail, soumis à l'action d'une force inconnue R, dont le point d'application se déplace suivant une loi censée donnée. En joignant les équations de ce problème à celle qui vient d'être présentée, on aurait le moyen de déterminer à la fois la loi de variation des pressions et celle des oscillations du rail.

Il est ensuite donné lecture d'une note de M. *Lemoinne* (membre de la Société, ingénieur au chemin de fer de Strasbourg), *sur les plateaux-coussinets en fonte substitués aux traverses et coussinets ordinairement employés dans la construction des voies de fer.*

Les conclusions de cette note, basée d'ailleurs sur une application de ce système sur 2,000 mètres de longueur de voie, près de Bar-le-Duc, sont que, s'il présente quelques inconvénients, d'une importance secondaire d'ailleurs, ces inconvénients pourraient disparaître presque entièrement par l'augmentation du poids des plateaux et de leur surface d'assise et par l'adoption d'une forme plus rationnelle.

UN MEMBRE appelle l'attention de la Société sur l'extension de l'emploi de la fonte dans l'assiette des chemins de fer. En Angleterre, le rapport qui existe entre les prix de la fonte et ceux du fer est favorable à ce dernier. C'est de là en partie que proviennent les progrès du rail Barlow. En France, c'est le contraire; et si le prix de la première de ces deux matières vient encore à baisser, nul doute qu'elle ne puisse jouer un rôle important dans la voie. La question des coussinets-plateaux offre, en particulier, un grand intérêt, et il serait utile de réunir tous les renseignements possibles, non seulement sur les plateaux en fonte, mais encore sur ceux en bois.

UN AUTRE MEMBRE rappelle que, sur le chemin de fer du Nord, on a fait des essais comparatifs entre la voie ordinaire et la voie sur plateaux en bois, *système Pouillet.* Ce système se comporte aussi bien que le système ordinaire; mais, autant qu'il est possible d'en juger quant à présent, la dépense d'entretien est plus forte.

L'ordre du jour appelle ensuite la discussion du mémoire de M. Love, sur la résistance du fer et de la fonte.

M. BERTOT est d'avis que M. Love a attribué une importance trop grande aux expériences faites en Angleterre. Ainsi, ces expériences sont loin de contredire radicalement la loi suffisamment exacte pour la pratique, et jusqu'alors admise, que, dans certaines limites, le fer et la fonte, soumis à la traction, s'allongent régulièrement et proportionnellement aux charges. M. Love le reconnaît lui-même pour le fer, en disant qu'en pratique cette

loi peut être affirmée pour des charges allant jusqu'à la moitié de celle qui produirait la rupture.

Il n'est pas exact de prétendre qu'on ait admis, en France, que, sous une même charge, *le fer s'allonge plus que la fonte*, et l'on ne doit pas dire que M. Hodgkinson ait établi comme fait nouveau, résultant de ses expériences, que *la fonte s'allonge plus que le fer* dans cette circonstance. Les divers auteurs qui ont traité de la résistance des matériaux ont toujours représenté par 20,000 kil. et 12,000 les *modules d'élasticité* respectifs du fer et de la fonte, le centimètre carré étant pris pour unité de section; or, on sait que le module d'élasticité représente la charge capable de doubler la longueur d'une barre, dont la section serait égale à l'unité, les allongements étant supposés constamment proportionnels aux charges qui les produisent; il était donc bien établi, avant les expériences de M. Hodgkinson, que la fonte s'allonge plus que le fer, à égalité de charge par unité de section.

Quant à la limite d'élasticité, M. Hodgkinson conclut de ses expériences qu'on s'est fait illusion en croyant pouvoir la fixer; mais ces expériences peuvent-elles détruire les faits observés par les expérimentateurs qui ont précédé M. Hodgkinson?

Le mémoire de M. Love conclut aussi, des expériences faites en Angleterre, qu'il est faux qu'il existe un point où l'action de la charge prolongée augmente sans cesse l'allongement et finisse par provoquer la rupture; mais aux expériences de M. Hodgkinson on peut opposer les résultats contraires observés par M. Vicat.

S'appuyant sur les expériences de M. Hodgkinson, relatives à la résistance des piliers, M. Love présente comme un fait nouveau que, lorsqu'on dépasse, pour les piliers, une longueur égale à trente fois le diamètre, le fer résiste mieux que la fonte. Suivant M. Love, l'opinion contraire était admise. Or, MM. Navier et Poncelet citent des expériences de Rondelet et de Rennie, qui, depuis long-temps, ont fait connaître la supériorité de la résistance du fer sur celle de la fonte pour des piliers dont la hauteur excède environ trente fois la longueur du diamètre.

En général, le mémoire a pour tendance de sacrifier les auteurs français aux expérimentateurs anglais, qui sont loin d'avoir infirmé les principes émis par les premiers. Ainsi, le coefficient 1/3, que M. Hodgkinson propose en remplacement du coefficient 1/6 dans la formule qui donne la résistance à la rupture par flexion d'un prisme rectangulaire, n'avait-il pas été déjà trouvé par Mariotte? Navier avait déjà fait observer que la formule ainsi modifiée fournissait des résultats concordant avec ceux de l'expérience.

La théorie de M. Cox sur la flexion d'un pont sous le passage d'une charge en mouvement apprend-elle quelque résultat qui n'ait été développé par MM. Navier et Poncelet?

M. LE GÉNÉRAL PONCELET ne croit pas que les expériences de M. Hodgkinson soient suffisantes pour donner la certitude que la fonte s'allonge beaucoup plus que le fer. A ces expériences on peut en opposer de beaucoup plus précises, celles de M. Ardant, qui soumit des prismes à des charges croissantes agissant verticalement, tandis que des appareils spéciaux mesuraient l'allongement.

Passant à la question de la limite d'élasticité, le général Poncelet rappelle que c'est M. Tredgold qui, le premier, a eu l'idée de supposer que l'élasticité s'énervait au delà d'une certaine limite. C'est une idée heureuse; il est en effet plus rationnel de se servir d'un coefficient d'élasticité que d'un coefficient de rupture; il n'y a point de rapport entre la charge de rupture et celle d'allongement. En ce qui concerne la détermination de ce coefficient, il peut y avoir matière à contestation. M. Tredgold a énoncé que la limite correspondait au tiers du poids de rupture; mais M. Poncelet a démontré qu'il fallait doubler ce chiffre.

Maintenant, peut-on dire qu'en France on ait admis en principe une *limite d'élasticité*? La permanence de l'allongement y est connue depuis long-temps; et M. Poncelet, dans son ouvrage, a donné des courbes qui, continues et concaves, dès l'origine, s'accordent à prouver que l'allongement a lieu dès les plus petites charges et avec permanence. Ces mêmes courbes font voir que l'allongement n'est pas proportionnel aux charges, mais qu'il s'en faut d'une fraction négligeable en pratique.

UN MEMBRE fait observer que la discussion doit porter sur le point capital qui ressort des expériences de M. Hodgkinson et du mémoire de M. Love, à savoir : que les lois qui régissent l'allongement sont communes à la compression ou raccourcissement et à la traction ou allongement. Avant ces expériences, les ingénieurs étaient portés à suivre l'exemple de Stephenson qui, supposant que les chemins parcourus par une pièce soumise à la compression étaient plus petits que si elle eût été sollicitée par la traction, établissait des rapports de 3 1/2 à 5 entre les sections du métal soumis à ces deux genres d'efforts.

Depuis que les expériences de M. Hodgkinson, dont M. Yvert a déjà fait connaître quelques résultats dans son ouvrage sur les ponts tubulaires, ont été mises complétement au jour par le travail de M. Love, il y a tendance à revenir à la figure d'égalité pour les deux sections.

M. LE GÉNÉRAL PONCELET est d'avis qu'il était de la plus haute importance de s'assurer si la résistance à l'extension est ou n'est pas plus grande que la résistance à la compression; et il fait remarquer, d'ailleurs, que jamais la théorie n'a refusé d'admettre que les deux natures de résistance eussent la même virtualité; mais qu'il ne faut pas pour cela avoir une confiance absolue dans les expériences de M. Hodgkinson, et qu'en pareille matière il faut être assuré que la plus grande précision a présidé aux essais.

On a déduit avec une grande précision, en ces derniers temps, le coefficient d'élasticité d'après les vibrations; mais cette méthode n'est applicable qu'aux plus petits allongements; il n'est pas impossible que tout change lorsqu'on opère avec de grands poids et qu'on arrive jusqu'à celui de rupture; la fibre neutre peut être placée différemment pour une charge simple que pour une charge décuple.

M. SCIAMA (ingénieur des ponts et chaussées) rappelle qu'on a fait en France des expériences sur le fer et sur le bois avec des charges assez considérables; c'est Duhamel qui a expérimenté le bois; mais tous ces essais ont été faits assez grossièrement.

UN MEMBRE, traçant l'historique des faits qui ont conduit aux formes actuellement admises, rappelle qu'en Angleterre l'usage avait fait prévaloir

une poutre d'une forme irrationnelle, composée de fonte et de fer, pour laquelle les attaches n'étaient pas dans la direction des forces sollicitantes; des accidents en résultèrent; le Parlement s'en émut, ordonna une enquête, et avant la fin de cette enquête, tous les ponts construits sur ce principe avaient disparu; on ne retrouve plus cette poutre défectueuse que dans des ouvrages de cette époque.

On étudia avec soin la question des formes, et l'on se demanda si dans des poutres soumises à la fois à la compression et à la traction les espaces parcourus sous l'empire de ces deux efforts étaient réellement différents.

C'est alors qu'intervinrent les expériences d'Hodgkinson, expérimentateur habile, persévérant, savant très distingué et disposant de toutes les ressources de la science, qui détermina les figures de rupture correspondant à des efforts variés, et conclut à l'égalité des espaces parcourus sous la sollicitation des efforts des deux natures.

Les résultats des expériences d'Hodgkinson devaient avoir et ont eu une grande influence sur les ingénieurs qui s'occupent de constructions.

M. Stephenson, persuadé que le ciel du pont de Menai se comprimerait plus que la partie inférieure ne s'allongerait, a réparti sur le premier un excédant de poids considérable, au grand détriment du prix de revient; mais, depuis les expériences d'Hodgkinson, il semble avoir regretté de ne pas avoir adopté des sections égales. Fairbairn, qui a précédé Hodgkinson, est formel, et affirme que le fer résiste moins à la compression qu'à la traction; Clarke, qui vient après Hodgkinson, est déjà beaucoup moins affirmatif.

Quant à lui, il n'a cessé de lutter contre les coefficients trop bas, adoptés par les corps savants qui dirigent en France les travaux publics; il ne saurait accueillir avec trop d'intérêt et d'approbation les expériences pratiques qui nous viennent d'Angleterre et qui, prouvant qu'on peut arriver plus près des limites de déformations qu'on ne l'a fait jusqu'ici, auront pour résultat d'économiser des poids considérables et inutiles.

LE GÉNÉRAL PONCELET fait remarquer que la France a, la première, donné l'exemple des expériences, sur une petite échelle, il est vrai; mais, à cet égard, l'Angleterre ne doit qu'à ses capitaux l'avantage qu'elle a pris sur nous. Il insiste vivement sur la nécessité d'entrer pleinement dans cette voie expérimentale.

UN MEMBRE fait l'objection suivante au mémoire de M. Love, dans lequel il est dit que la vitesse augmente considérablement l'effet d'un poids donné, et qu'on a trouvé par expérience qu'une charge de 805 kilog. à la vitesse de 48 kilomètres à l'heure suffisait pour rompre des barres, tandis qu'au repos il fallait une charge de 1,880 kilog. pour produire le même effet; on lit plus loin, dans le même mémoire, qu'aucune vitesse possible de la charge ne pouvait lui faire exercer une pression double de celle qu'elle produit à l'état statique.

M. LOVE fait observer que pour rendre la discussion plus précise et plus fructueuse, il eût été à désirer que M. Bertot lui eût communiqué d'avance la note des divers points sur lesquels il avait l'intention de l'interpeller; ou mieux encore, comme ces points paraissent assez nombreux, quoique d'une importance secondaire, il aurait pu les présenter sous forme d'un contre-

mémoire, de manière que des deux parts les points de dissidence eussent été nettement et clairement posés pour tout le monde. — Dans l'état actuel des choses, c'est tout au plus si M. Love se souvient de deux ou trois des nombreuses observations présentées par M. Bertot. Il répondra à celles-là d'abord, quitte à revenir plus tard sur celles qu'il aurait oubliées.

M. LOVE maintient qu'en ce qui concerne la proportionnalité de l'allongement à la charge, les nouvelles expériences établissent un point de démarcation avec ce que l'on croyait auparavant.

Atténuer la différence pour le fer dans certaines limites n'est pas reconnaître que le fait de la non-proportionnalité n'existe pas. — Il faut dire ce qui est, et laisser à chacun le soin de juger par lui-même. Dans la fonte, d'ailleurs, il n'y a aucune atténuation possible, et la proportionnalité de l'allongement à la charge n'existe à aucun degré que ce soit : aussi M. Bertot s'est bien gardé d'en parler, dans la crainte, sans doute, d'affaiblir ses observations sur ce point.

Quant à la question de la *limite d'élasticité* elle a été posée par Tredgold dans son *Essai sur le fer coulé*, et tous les poids donnés par ses formules sont, d'après cet auteur, ceux que les solides peuvent porter, sans danger de dépasser cette *limite d'élasticité*. Pendant long-temps, et jusqu'à une époque très rapprochée de nous, les ingénieurs, aussi bien en France qu'en Angleterre, n'ont pas eu recours à d'autre formulaire pratique, et l'on peut par conséquent dire qu'ils avaient adopté la manière de voir de Tredgold.

Dans la question de la résistance des solides à l'effort transversal, Mariotte avait-il réellement découvert que le coefficient 1/3 avait été substitué au coefficient 1/6? Navier avait-il reconnu la concordance de ce résultat avec l'expérience? M. Love confesse ignorer cette particularité, sur laquelle il voudrait être édifié d'une manière plus précise. — Dans tous les cas, il est au moins étonnant qu'il n'en soit rien dit dans les traités les plus récents sur la matière, et qui sont censés résumer exactement l'état de la question. — D'ailleurs les observations présentées dans le mémoire de M. Love ne s'appliquent pas à Navier, que les praticiens délaissent complétement, mais à l'*Aide-Mémoire* de M. Claudel et à la *Mécanique industrielle* de M. Poncelet, qui sont les seuls auteurs actuellement entre les mains des ingénieurs français.

SÉANCE DU 5 NOVEMBRE 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

UN MEMBRE demande à compléter les explications qu'il a données dans la séance précédente au sujet de la variation des pressions exercées par un véhicule en mouvement sur les rails d'un chemin de fer, et qui proviennent

de la flexion des rails et des ressorts de suspension. Ce n'était là qu'un détail de la question soumise à la discussion, question ayant pour objet l'efficacité des freins que l'on supposait dépendre de la vitesse.

Il s'est occupé de cette question; mais avant d'indiquer les résultats auxquels il est parvenu, il précise la question en ces termes :

Supposons, pour simplifier l'exposé, qu'il s'agisse d'un véhicule de poids P circulant sur une voie horizontale, et animé d'une vitesse de translation V_o au moment du serrage des freins; admettons que le mouvement de rotation de toutes les roues ait été détruit, soit V la vitesse après un parcours X effectué depuis le serrage des freins, f le coefficient du frottement de glissement sur les rails. Si la vitesse ne devait avoir aucun effet sur la pression, cette dernière serait égale au poids du véhicule, et l'équation des forces vives donnerait :

$$\frac{P}{G}\left(\frac{V_o^2 - V^2}{2}\right) = f\,P\,X \quad \text{d'où} \quad V_o - V = \frac{f\,G\,X}{\frac{1}{2}(V^o + V)}$$

équation qui détermine la vitesse après un parcours X, ou la réduction de vitesse $(V_o - V)$ après ce parcours, en fonction de la moyenne $\frac{1}{2}(V^o + V)$ des vitesses extrêmes. Il s'agit de savoir si cette expression subsiste, au moins approximativement, quelle que soit la vitesse, ou plus exactement, lorsqu'au lieu du poids P, qui sert ici de mesure aux réactions verticales, on introduit les vraies valeurs de celles-ci. Ces réactions dépendent à la fois de la flexion des rails et de celle des ressorts de suspension.

Après en avoir fait le calcul, il dit que l'expression précédente est encore sensiblement vraie dans ces circonstances (on ne tient ici aucun compte des frottements latéraux des boudins des roues, qui se produisent dans les courbes, et par suite du mouvement de lacet); les quantités négligées répondent au travail de la pesanteur sur le véhicule. Or, les différences de niveau des positions extrêmes du centre de gravité produites par les flexions donnent lieu à un travail négligeable par rapport à celui du frottement, pour peu que le chemin X comprenne deux ou trois fois l'intervalle des traverses.

Plusieurs membres ayant manifesté l'opinion que les freins paraissent moins efficaces à de grandes qu'à de petites vitesses, il fait remarquer, en se rapportant à la 2e équation ci-dessus, que, pour un même parcours X, la diminution de vitesse $V_o - V$ est en raison inverse de la vitesse moyenne $\frac{1}{2}(V^o + V)$; ce qui explique parfaitement les faits observés. Au reste, il serait bon de recourir à l'expérience pour vérifier cette théorie.

LE PRÉSIDENT invite les membres qui désireraient proposer des changements au règlement à présenter des propositions dans la séance du 19 novembre.

Il lit ensuite les art. 131 et 132 du règlement, ainsi conçus :

« Art. 131. — La révision du règlement ne peut avoir lieu qu'à la fin » de chaque exercice; et les modifications ne peuvent être votées qu'à l'as- » semblée générale de décembre.

» Art. 132.—Si, dans l'une des réunions de novembre au plus tard, une » proposition à fin de révision de telle ou telle clause du règlement, signée » par cinq sociétaires, a été déposée sur le bureau, la réunion consultée vo- » tera à la majorité simple sur la prise en considération. »

M. BERTOT lit ensuite une note dans laquelle il combat les faits, les formules et les calculs présentés par M. Love; il cherche en outre à établir que M. Hodgkinson n'a rien indiqué de nouveau, et que tous les résultats qu'il a tirés de ses expériences étaient connus depuis long-temps de tous les savants français.

UN MEMBRE fait observer que M. Hodgkinson se trouve attaqué dans cette discussion. Or, il ne faut pas oublier que M. Love a interprété à sa manière les résultats des expériences faites par M. Hodgkinson; qu'il est donc seul responsable des diverses formules qu'il a données dans son mémoire.

Il a rendu un service incontestable en faisant passer dans notre langue les résultats des travaux de M. Hodgkinson. Ces résultats ont ensuite été interprétés par M. Love, qui en a déduit des conséquences, des formules, qu'il est très bon de discuter. Mais, quant aux expériences de M. Hodgkinson, elles ont été faites sur une grande échelle, avec beaucoup de soin, et tout le monde sait que ce savant étranger, loin de contester le mérite des savants français, est parti des formules des théoriciens français, en considérant comme bon ce que ses devanciers avaient fait, et en cherchant seulement à éclairer les points encore douteux, à agrandir le champ des connaissances actuelles, et, surtout, à donner aux hommes pratiques des bases plus certaines et plus larges dans les nombreuses applications qu'ils sont appelés à faire des métaux dans les travaux d'art de toute nature qui s'exécutent en si grand nombre en ce moment. Nul, jusqu'à ce jour, n'a contredit les faits recueillis par M. Hodgkinson.

Ce sont ces résultats pratiques, ces données d'expériences mises à la disposition des ingénieurs, qui distinguent surtout les travaux de M. Hodgkinson; c'est ce progrès que les savants français n'ont pas fait ni fait faire; et ce que les ingénieurs leur reprochent surtout, c'est de n'avoir pas mis les résultats de leurs recherches à la portée des hommes pratiques. Ils ont toujours dit que tout était dans leurs formules et qu'il n'y avait plus rien à faire. Cette manière de raisonner a amené cette conséquence déplorable, que tous les corps savants ont imposé à l'industrie française des coefficients très défavorables à l'emploi des métaux; et c'est là justement le service rendu par M. Hodgkinson, dont les expériences ont démontré que les coefficients imposés par les corps savants français sont trop bas.

Le grand intérêt de la discussion actuelle doit porter sur l'interprétation des travaux de M. Hodgkinson.

M. LOVE étant absent, la suite de la discussion est remise à la séance suivante.

L'ordre du jour appelle la lecture du mémoire de L.-D. Girard, intitulé : *Hydraulique appliquée. — Nouveau système de locomotion sur les chemins de fer.*

L'auteur commence par exposer que son système repose sur le principe de la transmission de la puissance des chutes d'eau aux turbines hydrauliques, qu'il a appelé principe de la déviation libre de la veine liquide, dans ses précédentes communications.

Pour en réaliser l'application, on fixe, sous la ligne des wagons, deux séries rectilignes d'aubes courbes; l'une qui sert pour la marche en avant, et l'autre pour la marche en arrière.

Le long de la voie règne un gros tuyau en fonte, enterré, mis en communication avec des pompes qui sont mues, soit par des chutes d'eau, soit par des machines à vapeur fixes (Cornouailles), de manière à fournir l'eau à haute pression destinée à faire marcher le convoi. Les machines seront placées à des distances d'environ 20,000 mètres, en moyenne, l'une de l'autre.

Sur ce tuyau sont placées à des distances variables (100 mètres au plus), selon le profil de la voie, des prises d'eau aboutissant chacune à un distributeur à deux becs dirigés en sens opposé. Les jets d'eau lancés par les distributeurs agiront sur la concavité des surfaces courbes en série rectiligne, seront déviés sur ces surfaces d'environ deux angles droits, et pousseront le train auquel ces surfaces sont fixées, suivant la direction du bec ouvert.

On fait connaître, dans le mémoire, le mode d'action des distributeurs pour produire la manœuvre du convoi, pour la marche en avant et en arrière, pour la mise en train ou l'arrêt.

Une vitesse de marche de 20 mètres par seconde correspondant à une vitesse de 40 mètres de l'eau motrice injectée, il y aura une pression effective de 8 atmosphères dans le tuyau. Sous cette pression, un jet de petite dimension, débitant 200 litres par seconde, développera une force de 160 chevaux utiles, suffisante pour un train de voyageurs marchant à 72 kilomètres à l'heure sur un chemin de niveau. Avec cette vitesse de 20 mètres par seconde, le tiroir distributeur doit s'ouvrir dans un dixième de seconde. Le mémoire montre que cette condition peut être remplie sans que l'inertie de la masse d'eau à mettre en mouvement influe d'une manière appréciable sur la vitesse de l'eau injectée pendant cette période de l'ouverture du tiroir.

D'après le principe rappelé ci-dessus, cette vitesse du convoi pourra être maintenue malgré les variations de pression, même considérables, qui pourront résulter du profil en long de la voie.

Les principaux avantages de ce système sont les suivants :

1° La force propulsive, agissant régulièrement et dans l'axe même du convoi, annule les mouvements de lacet et autres, d'où moins de chances de déraillement, moins de fatigues et de dangers pour les voyageurs.

2° La suppression de la locomotive complète toute sécurité à cet égard; cette suppression assure une longue durée au matériel des voies existantes et permettra de faire ce matériel plus léger dans les applications du système proposé.

3° En supprimant les mouvements de lacet et autres, on détruit l'un des obstacles les plus puissants à l'accroissement de la vitesse. On arrive au même but par la suppression du poids mort de la locomotive et de son tender, par la facilité de l'arrêt et la mise en train, par l'absence du temps perdu pour prendre de l'eau et du coke, et enfin par la concentration de la puissance propulsive (à l'aide de prises d'eau suffisamment rapprochées) aux points où se présentent les plus grandes résistances. A cet effet, des réservoirs d'air seront disposés aux endroits convenables pour emmagasiner la force des machines fixes, et assureront la régularité du mouvement des eaux alimentant les distributeurs.

4° Le conducteur du train, placé sur le premier wagon, peut facilement, par une manœuvre analogue à celle d'un gouvernail, produire la marche en avant, la marche en arrière. S'il veut modérer sa vitesse, il peut passer,

sans les ouvrir, un ou plusieurs injecteurs; il a, indépendamment du frein, un moyen très énergique d'arrêter, en faisant agir l'eau en sens inverse de la marche.

5° Chaque wagon portant ses deux séries d'aubes pour la marche en avant et en arrière, les trains peuvent se composer comme on veut, les manœuvres de gare deviennent faciles, et la plupart des plaques tournantes peuvent être supprimées. Le train peut se diviser sur le parcours ou se grouper au retour très promptement.

6° Par la facilité de parcourir la voie rapidement avec un seul wagon, la surveillance de la ligne est rendue plus aisée et plus efficace.

Le mémoire indique les moyens de parer à tout accident, tels que rupture de tuyau, engorgement par la gelée, dérangement d'un tiroir, etc., sans entraver le service.

Passant ensuite à la comparaison entre le système actuel et le système proposé, en prenant pour exemple la ligne de Paris à Montereau, sur laquelle M. Jules Poirée a fait récemment des expériences, l'auteur établit :

Qu'à égalité de consommation de charbon, on remorquerait sur cette ligne, par la propulsion hydraulique, une charge égale à trois fois et demie celle que l'on remorque aujourd'hui;

Et que, si le profil de la voie, au lieu de présenter des rampes de $0^m,005$ au maximum, offrait des rampes de $0^m,010$, le rapport des charges remorquées serait encore plus considérable.

D'où il suit que, les frais de traction diminuant, on pourra abaisser le prix de transport, par suite activer la circulation et faciliter à un haut degré les transactions commerciales.

L'adoption du chemin de fer hydraulique aurait encore deux conséquences importantes : on pourrait 1° faire des distributions d'eau générales, à haute pression, dans toutes les localités traversées par le chemin de fer, opérations très avantageuses pour les villes auxquelles elles épargneraient les frais d'établissement et d'entretien de machines spéciales; 2° recueillir l'eau qui a servi à la propulsion, dans les fossés qui bordent la voie, pour l'employer aux irrigations.

UN MEMBRE fait observer que, pour obtenir des vitesses non pas exagérées, mais en rapport avec les exigences actuelles, le système proposé par M. Girard exigerait des pressions d'eau très considérables, par suite, des machines d'une très grande puissance et d'une grande valeur; que tous les mécanismes employés pour l'ouverture et la fermeture des prises d'eau, pour la marche en avant ou en arrière, éprouveraient des chocs très violents et ne résisteraient pas.

Il fait remarquer que ce système présente les inconvénients de tous ceux où l'on emploie des machines fixes. Les chemins atmosphériques, après de longues expériences, ont été rejetés pour cette raison qu'ils employaient des machines fixes, qu'il fallait employer pour satisfaire à un travail considérable, de manière à traîner les trains le plus lourdement chargés et dans des cas exceptionnels. De sorte que, dans les circonstances ordinaires, les machines étaient beaucoup trop puissantes. Avec ce système, on fait un mauvais emploi de la force, tandis qu'avec des machines locomotives la force est toujours à la disposition de celui qui veut s'en servir, et l'on peut

satisfaire sans excédant sensible de dépense aux plus grands comme aux plus petits trafics.

Quand, au lieu d'employer l'air, on voudrait se servir de l'eau comme moteur, les inconvénients seraient bien plus considérables avec des machines espacées tous les 20 kilomètres ; il faudrait leur donner des forces de 5 à 600 chevaux, et encore ne pourrait-on pas toujours satisfaire aux exigences du service.

Il pense que l'établissement des aubes pour chaque wagon doit entrer en ligne de compte, tandis que M. Girard en fait complétement abstraction dans son estimation.

Il dit ensuite que, dans ce système, il arrive à chaque instant que le moteur, commençant à entraîner le train par la tête, finit par le pousser par la queue. Il croit ce moyen d'agir très dangereux.

Le débit irrégulier de l'eau ou la manière très variable dont ces mécanismes fonctionnent seront une des causes de perte considérable d'effet utile. Les machines de Cornouailles ne donnent de bons résultats que parce qu'elles marchent très régulièrement.

Quant aux détails, il pense que l'installation et l'entretien des mécanismes seraient très coûteux. Les robinets, les vannes, fuiraient facilement, manœuvrés souvent comme ils le seraient sous des pressions de 13 à 15 atmosphères.

M. GIRARD répond aux diverses objections qui viennent d'être soulevées.

S'appuyant en premier lieu sur les résultats des expériences qu'il a faites de concert avec M. Ch. Challon sur les turbines *à libre déviation de la veine*, et dont il a communiqué précédemment à la Société un tableau inséré au compte rendu de l'Académiedes sciences, il explique, par un tracé en grandeur naturelle des courbes des récepteurs appliqués aux wagons, l'action des veines liquides sur ces courbes ; il fait observer que cette action s'exerce nécessairement d'une manière plus favorable sur des surfaces en série *rectiligne* que sur celles des turbines expérimentées, et il montre que, pour une pression de 8 atmosphères, par exemple, la vitesse du train peut varier entre 50 et 100 kilomètres par heure sans que le rendement du récepteur descende au-dessous de 75 1/2 0/0, chiffre sur lequel tous les calculs du mémoire sont basés.

Répondant à l'objection relative à l'ouverture et à la fermeture des tiroirs, M. Girard montre par les plans de détail annexés au mémoire que les chocs qu'il redoute n'existent pas, et qu'un effort tout à fait insignifiant suffit pour opérer la manœuvre de ces organes.

Quant à ce qui a été dit sur l'impossibilité où serait le chemin de fer hydraulique de se plier aussi bien que les locomotives aux exigences variables du trafic, l'auteur du mémoire répond que les calculs qu'il a présentés se rapportent à une circulation variable de 16 à 24 passages, mais qu'il établira par des calculs analogues que son système se prêterait au besoin à une variation de 24 à 96 passages par jour, avec plus d'avantage même que dans le premier cas.

C'est avec intention qu'on a négligé, dans l'appréciation des dépenses, le coût des *récepteurs*, lequel ne s'élève qu'à 250 fr. par wagon. L'auteur pose en fait que cette dépense est bien inférieure à l'économie que

son système apporterait dans l'établissement et dans l'entretien des rails.

Le mode d'attelage indiqué, par imitation de ce qui se fait déjà sur plusieurs chemins de fer, rend sans valeur, selon M. Girard, l'objection faite au mode d'action de l'eau sur les wagons.

Car il est facile de démontrer que la composante normale de l'effort de propulsion dans une courbe de 500 mètres de rayon n'est que les 0,004 de cet effort sur le premier wagon, tandis que la force centrifuge qui a lieu au parcours de cette courbe pour une vitesse de 20 mètres environ par seconde en est au moins le tiers. — Il est d'ailleurs à remarquer qu'à certains égards la situation de la locomotive en avant du train est une mauvaise chose, car elle détermine par son poids énorme une déformation momentanée de la voie, qui, combinée avec le mouvement alternatif des pistons, devient une cause puissante de déraillement.

Quant à l'irrégularité ou discontinuité du débit de l'eau, elle n'affecte en aucune façon le jeu de la machine motrice, puisque celle-ci alimente une vingtaine de réservoirs à air comprimé.

M. GIRARD pense qu'on se fait une fausse idée de la fonction de ces réservoirs d'air ; ils emmagasinent et restituent tour à tour le travail qui leur est confié (à la manière d'un volant de machine à vapeur), précisément afin de satisfaire aux exigences qui font tantôt augmenter, tantôt diminuer la charge des trains. D'ailleurs, qui ne sait que les machines de Cornouailles ont besoin, pour le service des mines, de développer un travail variable, et sont effectivement très aptes à remplir ces conditions?

M. Girard termine en disant qu'il se réfère à son mémoire. Quant à la détermination des dépenses d'installation et d'entretien, il lui paraît que l'objection faite à cet égard n'a pas de portée, puisqu'il a tenu compte de ces dépenses dans l'appréciation des avantages de son système. Quant aux fuites, tout le monde sait bien qu'elles ne sont pas à craindre pour l'eau comme elles le seraient pour l'air. Il est possible que le souvenir du chemin de fer atmosphérique, avec sa fente longitudinale, ne soit pour beaucoup dans les craintes qu'on manifeste à ce sujet.

SÉANCE DU 19 NOVEMBRE 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

M. MIRECKI adresse à la Société une lettre dans laquelle il rectifie une erreur qui s'est glissée dans le compte-rendu de la séance du 13 octobre, dans lequel il est dit que l'entretien de la voie du système Pouillet était plus cher que celui de la voie ordinaire; c'est le contraire qu'il a voulu dire.

M. MANIEL, ingénieur en chef des ponts et chaussées, et ingénieur de la

voie au chemin de fer du Nord, écrit également pour rectifier et préciser les renseignements fournis à la Société sur l'entretien de la voie Pouillet.

Il dit qu'on a établi sur la ligne de Saint-Quentin 4,070 mètres de voie simple du système Pouillet, avec rails de quatre mètres 50 centimètres de longueur, et cinq traverses par longueur de rail. Cette voie est placée à côté d'une autre du système ordinaire, avec rails de même longueur et quatre traverses par longueur de rail.

Ces voies sont en exploitation depuis la fin de mai 1849. Voici jusqu'à présent les résultats observés :

1° La voie Pouillet est meilleure que la voie ordinaire ; les joints en sont parfaits.

2° La dépense d'entretien a été un peu plus forte dans les premiers temps pour la voie Pouillet que pour la voie ordinaire ; mais cela tenait à ce que le chemin est établi en partie sur un coteau assez incliné, et la voie Pouillet se trouve du côté du remblai le plus fort.

A l'expiration des dix-neuf premiers mois d'exploitation, c'est-à-dire en janvier 1851, le prix moyen d'entretien porté à l'année était :

Pour la voie ordinaire, de 288 fr. 11 cent. par kilomètre de simple voie.

Pour la voie Pouillet, de 407 fr. 64 cent. par kilomètre de simple voie.

Depuis janvier 1851, le remblai étant mieux assis, l'entretien de la voie Pouillet n'a coûté en moyenne que. . . . . 204' »
par kilomètre de simple voie et par an, tandis que l'entretien de la voie ordinaire a donné lieu à une dépense de. 377 37

Différence en faveur de la voie Pouillet, par kilomètre et par an 173 37

Cet avantage a été obtenu par des progrès successifs, qui ne sont pas encore arrivés à leur terme.

Il y a donc économie incontestable en faveur de la voie Pouillet.

Il ajoute que les cantonniers aimeraient mieux qu'on eût employé une traverse de moins dans ce système : avec cinq supports par rail, les traverses sont trop serrées, et le travail du bourrage est gêné.

Il résulte donc de ces observations que les traverses Pouillet se sont très bien maintenues jusqu'à présent ; l'avenir dira combien de temps cette situation durera encore, et quelles seront, pour l'entretien, les conséquences d'un commencement de dislocation.

Telles sont les observations faites jusqu'à ce jour.

M. POUILLET écrit également dans le même sens ; il ajoute seulement quelques chiffres relatifs à l'entretien de la voie Pouillet sur le chemin de fer de l'Ouest.

Le relevé des dépenses de 1850 est tout-à-fait favorable au système Pouillet, qui n'a donné lieu qu'à une dépense de 285 francs par kilomètre, lorsque la voie ordinaire donnait 702 ; mais cette différence ne sera plus désormais aussi considérable, car on a fait désaboter en 1850 sur la voie ordinaire plus de 100 traverses mal sabotées qui rendaient l'entretien beaucoup plus dispendieux. Si cette cause n'eût pas existé, l'entretien ordinaire aurait

été tout au plus le double de l'entretien de la voie Pouillet; il y a donc lieu d'admettre cette proportion.

Les coussinets cassés en 1850 sur la voie Pouillet ont été : 6 joints ou 2 1/2 par kilom.; 3 intermédiaires ou 1 1/4 par kilom.

Les coussinets de la voie ordinaire ont été en nombre assez considérable à cause du désabotage, qui est un fait accidentel.

Ils ont été de 27 joints; 22 intermédiaires.

De tout ceci il résulte que les expériences sont très favorables au système Pouillet, dont les dépenses d'entretien paraissent être réduites à moitié de celles que présentent les voies ordinaires, ce qui tient d'ailleurs en grande partie à l'extrême précision avec laquelle les inventeurs ont fait le sabotage de leurs plateaux-coussinets.

M. LE PRÉSIDENT donne lecture d'une demande faite par cinq membres pour la révision des statuts de la Société, comprenant les articles 4, 5, 16, 21 et 25, et pour la révision de quelques articles du règlement qui, renvoyés l'année dernière à MM. Flachat, Vuigner, Polonceau et Callon, ont été corrigés et modifiés.

Ils demandent :

1° L'adoption de membres honoraires;

2° La création d'une présidence honoraire;

3° La rééligibilité chaque année de tous les membres du bureau.

La prise en considération de la révision est mise aux voix et adoptée. En conséquence, une commission de cinq membres a été nommée au scrutin secret : elle se compose de MM. *Loustau*, *Polonceau*, *Gerder*, *Yvert* et *Bellier*, qui devront dans la prochaine séance présenter un rapport sur les révisions proposées.

M. LE PRÉSIDENT entretient ensuite la Société du compte-rendu de la première séance de la Société des ingénieurs civils de Londres, où l'on a discuté un travail intéressant sur le *perfectionnement des baies maritimes*.

M. LORENTZ se charge de présenter à la Société la traduction du procès-verbal de cette discussion dans la prochaine séance.

L'ordre du jour appelle la suite de la discussion du mémoire de M. Girard sur les chemins de fer hydrauliques.

UN MEMBRE fait observer que dans ce système il devra résulter nécessairement de la direction de la veine fluide contre les aubes des récepteurs, une composante qui tendra constamment à les pousser contre les rails et à les briser; il craint en outre que le froid en gelant l'eau n'obstrue les aubes, et que le système ne fonctionne plus, comme cela arrive aux roues hydrauliques.

Il ajoute que cette masse d'eau sera souvent un grand embarras dans les parties où l'on ne pourra l'écouler facilement; déjà dans de certains points en palier, on a peine, dans le système actuel, à se débarrasser des eaux de source ou des eaux pluviales.

M. GIRARD répond que la composante dont on craint l'influence pourrait être complétement annulée si la vitesse des trains n'était pas variable; mais qu'au surplus dans cette dernière hypothèse, cette influence se mesure par 1 ou 2 0/0 seulement de la force de traction totale, ce qui est insignifiant,

puisqu'on a établi, dans la discussion de la dernière séance, que la poussée générale dans les courbes est, *pour chaque wagon*, le tiers au moins de la force de propulsion ; enfin, il est digne de remarque que deux voyageurs, pesant 10 à 20 kilog. de plus l'un que l'autre, et placés aux deux portières opposées d'un wagon, détermineraient une poussée latérale plus grande que celle que l'on redoute.

Quant au moyen d'empêcher l'eau de geler, M. Girard le trouve dans un bec de gaz qui chauffe les parois du tiroir entourées d'une enveloppe qui y maintient un matelas d'air chaud. Cette source de calorique, jointe à celle que dégagerait le frottement sur les aubes d'une masse d'eau animée d'une vitesse relative d'environ 20 mètres par seconde, suffirait au besoin pour fondre la couche de glace qui recouvrirait les aubes, loin d'en augmenter l'épaisseur. Enfin la température de l'eau de propulsion serait déjà maintenue à un certain degré par le refoulement dans la conduite de l'eau de condensation des machines fixes. Relativement à l'eau rejetée dans les fossés à chaque passage de convoi, il suffit de faire observer qu'elle correspond à peine à une tranche de $0^{m}.01$ d'eau sur toute la longueur des fossés comprise entre deux injecteurs, ce qui est bien inférieur au produit d'une pluie ordinaire dont la durée serait celle qui sépare deux passages consécutifs.

M. BERTOT fait observer que la vitesse de projection de l'eau n'est pas un moyen suffisant pour empêcher l'eau de geler ; ainsi, par exemple, dans les fontaines publiques, la forme parabolique de projection du jet d'eau reste indiquée dans les temps de gelée par une masse de glace.

M. GIRARD répond que, dans son système, la vitesse de projection de l'eau est beaucoup plus considérable que dans les fontaines publiques.

Il dit ensuite : 1° qu'il a laissé entre les injecteurs et les récepteurs fixés sous les wagons un jeu suffisant pour qu'ils ne puissent jamais venir en contact dans les mouvements de lacets ;

2° Que le poids du récepteur fixé sous chaque wagon est d'environ cinq cents kilogrammes (500 kilog.).

On fait observer que la tendance actuelle dans la construction du matériel est d'augmenter beaucoup la capacité des voitures et de réduire ainsi la longueur des trains ; en conséquence, le système de M. Girard, qui puise une partie de sa puissance dans l'étendue même des trains par la longueur de l'injecteur, se trouvera en contradiction avec le principe économique de trafic.

M. GIRARD, répondant à cette observation, fait remarquer qu'il est facile d'y avoir égard en rapprochant les injecteurs. Mais il ajoute aussitôt que, si l'on voulait faire marcher les lourds trains de marchandises plus lentement que les trains de voyageurs, on se trouverait déjà dans d'excellentes conditions sans rien changer à l'écartement des injecteurs : car, étant donnés, d'une part, un train de marchandises de 100 mètres de long, pesant 200 tonnes et marchant à 36 kilomètres à l'heure, et, d'autre part, un train de voyageurs de même longueur, mais ne pesant que 100 tonnes et animé d'une vitesse de 72 kilomètres, il résulte du principe même de propulsion exposé dans le mémoire qu'on satisferait à ces conditions si diverses sans que l'effet utile descendît au dessous de 75 0/0.

On fait observer que, la largeur d'introduction des aubes étant de 7 centi-

mètres et la vitesse des trains de 40 mètres par seconde, il en résultera que chaque aube présentera son orifice d'introduction devant le jet dans 1/570e de seconde ; or il est difficile d'admettre qu'à cette vitesse l'eau puisse pénétrer dans les aubes et les remplir.

M. GIRARD répond qu'il ne comprend pas du tout cette observation.

On cite cet exemple bien connu d'une conduite d'eau alimentée par un réservoir élevé et terminé par un disque percé de trous et auquel on imprime un mouvement rotatif, et où l'on observe que l'eau s'élève d'autant moins que la vitesse de rotation du disque est plus grande. C'est évidemment parce que l'inertie de l'eau s'oppose à l'établissement de l'écoulement permanent résultant de la pression. Ce fait explique assez ce qui se passerait dans le système de M. Girard.

M. GIRARD répond que l'expérience citée, dans laquelle un orifice était bouché et débouché plusieurs fois par seconde, n'a aucun rapport avec ce qui se passe dans son appareil, dont le tiroir reste ouvert en grand 40 ou 50 fois plus long-temps qu'il ne met à s'ouvrir ou à se fermer.

On répond qu'on ne conteste pas que la permanence du mouvement ne puisse s'établir sensiblement au bout d'un dixième de seconde ; mais pour prouver clairement qu'il en est effectivement ainsi, il conviendrait de faire usage des formules relatives au mouvement varié des fluides. A défaut d'intégrales exactes, on recourrait au procédé des quadratures. Du reste, lors même que la permanence du mouvement ne s'établirait qu'au bout d'un temps plus long, comme 2 ou 3 dixièmes de seconde, il n'y aurait pas un très grave inconvénient ; l'approximation que l'on obtiendrait ainsi serait de l'ordre de celles auxquelles s'arrêtent le plus souvent les ingénieurs.

M. GIRARD répond qu'il a montré dans son mémoire que pendant le dixième de seconde que le tiroir met à s'ouvrir, la vitesse de projection : $V = \sqrt{2g}\,H$ se réduit à $V' = \sqrt{2g}\,\frac{30}{31}\,H$, avec une approximation suffisante en pratique.

On objecte de nouveau qu'avec une vitesse aussi considérable que celle qu'il faudrait développer, l'eau aurait peine à s'introduire dans les aubes.

M. GIRARD répond que les courbes de récepteurs mobiles sont disposées de façon à toujours admettre l'eau, ainsi que le démontrent surabondamment les expériences citées dans le mémoire ; qu'en effet la condition d'introduction de l'eau dans un récepteur ne dépend que du rapport établi entre la vitesse de la veine et celle de l'aube, mais nullement des valeurs absolues de ces vitesses.

UN MEMBRE croit que les plus graves inconvénients de ce système consistent dans l'entretien des soupapes et du mécanisme.

L'eau serait un obstacle à la marche en hiver, et son accumulation, inévitable en certains points de la voie, la détremperait infailliblement.

M. GIRARD fait observer qu'il a répondu tout à l'heure à l'objection relative au versement de l'eau sur la voie ; il se réfère à son mémoire en ce qui touche l'entretien des machines.

SÉANCE DU 3 DÉCEMBRE 1852.

Présidence de M. E. FLACHAT.

M. CH. CALLON lit la traduction faite par M. TRÉLAT, membre de la Société, d'un compte-rendu de la séance du 23 novembre dernier de la Société des Ingénieurs civils de Londres, dans laquelle il a été lu un mémoire de M. ROBERT RAWLINSON sur le drainage des villes.

L'auteur rappelle que le drainage des villes est une question trop importante pour qu'on puisse la traiter complétement dans un travail destiné à être lu en une soirée; il a donc restreint le cadre de ses observations à l'examen de quelques points qui devront soulever la discussion et faire naître les critiques sur l'ancien et le nouveau système.

Il a borné le côté historique à la constatation de ce fait, que, dans les ruines des plus anciennes villes aujourd'hui découvertes, on a rencontré des portions de drains, et que le *grand cloac* formait une des merveilles de l'ancienne Rome.

Au point de vue politique, l'importance du système des égouts est incontestable, car c'est en améliorant l'état sanitaire d'une population qu'on parvient à diminuer la misère, le paupérisme, le vice et le crime qui accablent chaque cité. L'accroissement de population, constaté par les recensements, démontre qu'il y a nécessité de prévoir l'extension de toutes les grandes villes. En 1841, la population de cent dix-sept districts, y compris les chefs-lieux, était de 6,612,958 âmes. En 1851, ce nombre était de 7,795,958 dans les mêmes localités, où des maladies nombreuses firent des ravages qui auraient pu être prévenus en grande partie par des précautions sanitaires opportunes.

Mais l'attention des ingénieurs civils doit naturellement se porter tout d'abord sur les avantages sociaux que peut produire le *drainage de la ville*, car c'est sous ce rapport que la discussion doit éclairer la pratique actuelle et les perfectionnements proposés.

L'auteur ne traite pas les questions relatives aux formes, aux dimensions, aux prix, etc., des grands et des petits égouts; il croit que ces points de détail doivent toujours être abandonnés aux lumières et à l'expérience de l'ingénieur; il fait, toutefois, remarquer que le système le meilleur est celui qui permet au plus bas prix l'établissement de la plus grande étendue d'égouts.

La position du débouché des conduites doit être déterminée par les conditions naturelles du terrain, et les dimensions qu'on adoptera seront déduites de la surface et du nombre de maisons qu'il faudra desservir.

L'expérience et la pratique peuvent seules intervenir dans le choix des

matériaux de construction ; cependant les tuyaux en poterie paraissent à l'auteur constituer les égouts et les drains les plus économiques et les plus parfaits.

Les égouts ne peuvent recevoir les grandes eaux d'inondation, fussent-elles restreintes à celles qui proviennent de la localité desservie ; ils ne peuvent pas non plus être encombrés par le drainage environnant ni se joindre aux cours d'eau de la contrée ; il faut qu'ils soient uniquement installés pour conduire les matières solides et liquides provenant des habitations ; et il vaudrait mieux, pour les habitants d'une ville, ne pas avoir d'égouts du tout, que d'en avoir dont les dimensions fussent telles, que les matières pussent s'y amonceler en dépôt. L'emploi des pompes peut être avantageusement adopté dans certaines circonstances, comme, par exemple, lorsque les égouts n'ont pas d'issue disponible, soit par suite de la disposition du sol, soit par l'effet des marées. On a considéré comme heureuse la disposition qui consiste à interrompre la continuité des égouts à mi-pente. On a prôné les égouts de faibles dimensions quand on emploie des pompes, et l'on a dit qu'ils devaient être capables de résister à la pression hydraulique qui peut se déclarer à l'intérieur dans le cas où l'eau y pénétrerait.

Le courant doit être constant dans les égouts, et l'on a émis l'opinion que ce résultat ne pouvait être atteint qu'en employant de petites conduites.

Une quantité extraordinaire d'eau tomba en juillet 1845 à Birmingham. Elle s'éleva presque à une hauteur de 2 pouces (0^{m}.050) en une demi-heure, soit 9 gallons 091 par yard carré (49,3 par mètre carré), ou 44,000 gallons 140 par acre. L'auteur considère cette pluie si forte comme un argument contre l'établissement de grands égouts, inférieurs au plan des caves, et qui, pour être efficaces, devraient être capables de débiter les eaux des plus gros orages.

L'eau de surface ne pouvant être enlevée par les égouts, pendant les grandes pluies, on doit ménager le débouché naturel de superficie pour aider à écouduire hors des rues des grandes villes les eaux qui y tombent en abondance.

On signale à ce propos, dans la question du drainage des villes, ce fait remarquable, qu'originairement les égouts des villes n'avaient pas été établis pour recevoir l'écoulement des maisons ou du sol. On cite, pour appuyer cette allégation, le manque de communication entre les maisons et les égouts dans quelques points de la capitale, cette lacune absolue dans la ville de Paris, et la loi prohibitive rapportée il y a quelque temps seulement à Liverpool.

Quant aux tuyaux en poterie, on regarde comme trop faible pour certains drains le diamètre de 3 pouces (0^{m}.075), et 30 pouces (0^{m}.75), excédant les dimensions que permet d'atteindre convenablement la nature de la matière constitutive de ces tuyaux.

Les tuyaux de 4 pouces de diamètre (0^{m}. 100) doivent certainement être considérés comme présentant la moindre section qui puisse être appliquée aux drains des habitations, et ceux de 9 pouces (0^{m}.225) pour le service des rues ; mais, dans ce cas, il faut prendre garde que la pente ne descende pas au dessous de *un soixantième*. Du reste, on a pensé que, s'il ne faut pas trop généraliser l'avantage qu'on peut retirer de l'emploi des égouts en

tuyaux, ce système ne doit pas, d'un autre côté, être entièrement condamné à la suite des exagérations des personnes sans expérience qui en ont fait usage. L'auteur a confirmé ce dernier point, en rappelant le succès général qu'on a retiré à Manchester des tuyaux ovales.

Il s'occupe ensuite des diverses espèces de joints, et recommande de ne pas adopter des diamètres excédant 15 pouces (0m.375); au delà de cette dimension, les ruptures sont fréquentes, parce que les deux surfaces de joints portent inégalement l'une sur l'autre. Les difficultés du moulage, du séchage et de la cuisson, croissent probablement comme le carré des diamètres, *et elles sont nombreuses* : si l'on fait de larges tuyaux trop minces, ils sont sujets à se casser après la pose, et si on leur a donné une grande force au moulage, ils s'aplatissent sous leur propre poids quand la terre est molle; ils se déforment en séchant ou se cuisent imparfaitement.

Les égouts en briques, formant voussoirs, et faites *ad hoc*, sont meilleurs et moins coûteux. Un égout de 3 pieds (0m.91), construit de cette manière, est plus économique qu'un égout en poterie de 20 pouces (6m.50). En outre, les capacités sont entre elles comme les carrés des diamètres, et il n'y a pas de raison pour que le conduit de briques ne soit pas aussi régulier à l'intérieur et aussi imperméable qu'une poterie quelconque.

Après avoir traité des branchements, des orifices, des regards et de la ventilation, l'auteur parle de l'emploi des conduites de fonte dans les mauvais sols, puis il résume ainsi son travail en établissant que :

Tous les égouts doivent être placés au dessous du plan des caves, et qu'ils doivent uniquement être affectés à leur destination spéciale. Les rivières et les cours d'eau naturels ne doivent participer en aucune façon à un système quelconque de drainage municipal, et, dans les localités submersibles, les conduites doivent pouvoir résister à une pression intérieure. Il faut garantir la libre évacuation des eaux aux débouchés, qui ne doivent être encombrés ni par un amoncellement de matières à l'intérieur, ni par le manque d'élévation des issues. Les petits drains doivent être ronds et les grands ovales; les plus grands rayons doivent être employés, et les pentes augmentées dans les courbes. Tous les égouts et drains doivent être imperméables à l'eau, et leurs surfaces doivent être égales et unies. Dans les localités escarpées, il faut amoindrir ou interrompre la pente des grands égouts, et les matériaux dont on fait choix doivent être de nature à résister à l'usure et aux causes de rupture. Partout où cela est possible, le débouché doit être très facile, et, dans tous les cas, on doit y ménager une complète ventilation. On n'a rien à dire des fosses d'aisances, car une localité où l'on tolère leur existence ne peut être considérée comme réellement *drainée*; on doit, toutefois, faire une exception pour celles qui avoisinent les décharges où aboutissent les derniers égouts; elles peuvent servir à utiliser des matières propres à l'agriculture.

Le véritable but de l'égouttage des villes est d'enlever le plus rapidement possible du voisinage des habitations ou des différents quartiers des villes tous les résidus sujets à décomposition et qui peuvent être emportés par les eaux : un pareil but, complétement atteint, constituerait un bienfait qui mérite d'attirer l'attention de l'ingénieur.

Après cette lecture, un membre fait observer que cette question a un

haut intérêt en Angleterre ; que d'abord la question de l'entretien des égouts avait été très disputée aux ingénieurs civils anglais par les ingénieurs militaires, mais qu'enfin les premiers l'avaient emporté par leurs connaissances spéciales des besoins de l'industrie ; qu'également les deux dernières épidémies du choléra avaient causé tant de désastres en Angleterre, qu'on avait senti le besoin de s'occuper spécialement de la question des égouts.

Il est à regretter qu'à Paris on n'ait pas suivi l'impulsion donnée en Angleterre.

Il y a deux systèmes d'égouts, les égouts français et les égouts anglais. Les premiers n'enlèvent que les eaux superficielles ; les égouts anglais enlèvent toutes les eaux de ménage, fosses d'aisances, etc., mais pour cela il faut beaucoup d'eau. Là où il n'y a pas d'égouts, les fosses sont à puisards, mais ces puisards sont souvent insuffisants, et, dès lors, ils sont une cause d'émanations méphitiques : aussi les supprime-t-on, et les remplace-t-on par ce nouveau système de drainage fait avec des tuyaux de terre. Ces tuyaux, fabriqués à de grandes pressions, supportent deux à trois atmosphères.

M. LE PRÉSIDENT remercie M. Trélat de sa communication et le prie de vouloir bien continuer sa traduction du mémoire de M. Robert Rawlinson et de la discussion à laquelle il aura donné lieu.

Il est ensuite procédé à la révision des statuts de la Société.

M. POLONCEAU, président de la commission de révision, a la parole.

L'article 4 ancien portait :

« Les membres de la Société, dont le nombre est illimité, se divisent en membres sociétaires, et membres associés ; le nombre des membres associés ne devra jamais excéder le cinquième de celui des membres sociétaires. »

La Commission propose de le modifier ainsi :

« Les membres de la Société, dont le nombre est illimité, se divisent en membres sociétaires, membres associés et *membres honoraires*. Le nombre des membres associés et des membres *honoraires* ne devra jamais excéder le cinquième de celui des membres sociétaires. »

M. LOVE demande que le nombre des membres associés et des membres honoraires ne puisse jamais excéder le nombre des membres sociétaires, et que dès lors il soit fixé égal à une fraction de celui-ci.

M. YVON VILLARCEAU demande que les statuts précisent la position des membres honoraires.

M. LE PRÉSIDENT lit l'article qui leur est applicable.

« Toute personne s'occupant spécialement de l'étude des sciences qui se rapportent à l'art de l'ingénieur, tout industriel, peut être admis dans la Société à titre de membre associé ou de *membre honoraire*.

» Les demandes d'admission pour être membre sociétaire ou associé sont faites dans la forme prescrite au règlement et soumises à l'approbation de la Société. »

M. POLONCEAU ajoute que la rédaction ne peut pas dire qu'on offrira le titre de membre honoraire, car ce serait une prétention peu convenable ; la rédaction de la Commission n'exclut personne, et satisfait en laissant toute latitude au Comité.

Pour être admis membre honoraire, il faut être présenté par le Comité. La Société décide ensuite au scrutin secret; et, pour être reçu, il faut avoir obtenu les trois quarts des suffrages des membres présents. Les membres honoraires ne pourront pas prendre part aux votes.

M. LE PRÉSIDENT met aux voix l'art. 4 modifié par la Commission. Cet article est adopté.

La Commission propose d'ajouter à la suite de l'art. 12 ce paragraphe :

« La Société n'est pas responsable des opinions de chacun de ses membres, même dans la publication de ses bulletins. »

Cet article sera reproduit en tête de chacune de ses publications.

M. LE PRÉSIDENT fait observer que la rédaction de cet article est semblable à celle de la Société des Ingénieurs civils anglais; il a l'avantage de donner aux discussions une liberté que sans cela elles n'auraient pas.

M. CALLON demande que les noms des personnes qui prennent la parole dans les discussions soient inscrits dans les comptes-rendus; que cela aura le précieux avantage de les rendre plus intelligibles.

M. POLONCEAU fait remarquer que la publication de ces comptes-rendus dans les journaux empêche de donner aux opinions émises quelquefois sans connaissance parfaite du sujet la responsabilité de leur auteur.

M. EUG. FLACHAT pense également que la désignation des personnes aurait le grave inconvénient de faire cesser toute discussion. C'est, au reste, ce qui est arrivé à l'origine de la publication des bulletins, où les noms des membres étaient inscrits; qu'au reste, tout membre a le droit de faire inscrire son nom sur les observations qu'il adresse; qu'ainsi tout est réservé.

La rédaction de la Commission est mise aux voix et adoptée.

La Commission propose d'ajouter à l'art. 15 : *Un censeur* qui sera élu.

M. ALCAN ne croit pas que la création de cette fonction soit nécessaire; que dans plusieurs Sociétés elle existe sans qu'on s'aperçoive jamais qu'elle agisse.

M. POLONCEAU répond que cette fonction est inscrite dans les statuts, qu'il faut par conséquent l'établir. La modification que la Commission propose n'a pas d'autre but.

M. EUG. FLACHAT repousse la partie de la rédaction de la Commission qui donne au censeur des attributions au dessus de celles du président.

La première partie de la rédaction de la Commission est mise aux voix et adoptée.

La deuxième est repoussée.

L'art. 21 des statuts porte : « Les membres du comité et du bureau sont rééligibles, mais la présidence ne peut être confiée au même sociétaire *pendant deux années consécutives.* »

La Commission propose de remplacer les quatre derniers mots par ceux-ci : *pendant trois années consécutives.*

M. EUG. FLACHAT demande le maintien des statuts; il combat la rédaction de la Commission.

M. POLONCEAU dit que la Commission a pensé que la présidence pouvait ne pas être bien comprise par un titulaire pendant une première année, et que, si ce titulaire avait donné des preuves suffisantes de soins et de bon vouloir, la Société reconnaissante pouvait lui continuer une année encore

ses pouvoirs, afin qu'il pût mettre à profit sa première année d'expérience.

M. CALLON repousse aussi la rédaction de la Commission ; il propose ce qui se fait à l'Académie des sciences, où le vice-président est de droit président l'année suivante.

M. LE PRÉSIDENT résume les trois propositions :

1° La rédaction actuelle des statuts ;

2° La rédaction nouvelle proposée par la Commission ;

3° La proposition de M. Callon.

M. LE PRÉSIDENT met aux voix pour savoir si l'on commencera à voter d'abord sur les amendements et ensuite sur le maintien de l'article actuel ; il est décidé qu'on votera d'abord sur les amendements. Celui de la Commission est mis aux voix et repoussé.

M. CALLON retirant sa proposition, il est voté sur le maintien de l'article actuel, qui est adopté.

La Commission propose d'ajouter, après l'article 21, un article ainsi conçu :

« Art. 22. La Société pourra décerner le titre de président honoraire à un de ses présidents, sur la proposition qui lui en sera faite par le comité. »

Cet article est mis aux voix et adopté.

La Commission propose également d'ajouter à la suite de l'art. 24 : « Les membres honoraires sont exempts de toute cotisation. »

Cette proposition est également adoptée.

SÉANCE DU 27 DÉCEMBRE 1852.

ASSEMBLÉE GÉNÉRALE.

Présidence de M. E. FLACHAT.

L'ordre du jour appelle l'exposé du trésorier sur la situation financière de la Société.

M. LOUSTAU, trésorier, constate que le nombre des Sociétaires, qui était au 26 décembre 1851 de. 242
s'est augmenté, par suite de nouvelles admissions, de. 34

Ce qui porte ce nombre, au 17 décembre 1852, à. 276
Démissionnaire. 1

Reste. 275

Les versements effectués pendant l'année 1852 se sont élevés à . . . . . 9,516 fr. 05 c.
Il reste à recouvrer en cotisations ou amendes. . . 2,254 35

Formant le total de ce qui était dû à la Société. . . 11,770 40

Au 1er janvier 1852 le solde en caisse était de. . .	1,640 fr.	75
Les versements pendant l'année 1852 se sont élevés à.	9,516	05
Total.	11,156	80
Les dépenses de l'année 1852 se sont élevées à . .	10,143	90
Solde en caisse au 17 décembre 1852.	1,012	90 c.

Le trésorier ajoute que l'état de la caisse permet de satisfaire aux dépenses courantes, et que cette bonne situation est due aux souscriptions volontaires, qui ont produit en 1851. . . . . 1,225 fr. »
Et en 1852 . . . . . 2,621 »
Total. . . . . 3,846 »

En se félicitant de l'empressement avec lequel un grand nombre de membres ont répondu à l'appel qui a été fait à ce sujet, le trésorier regrette que tant d'autres n'aient pas encore effectué leurs versements réguliers, sur lesquels il reste encore dû une somme de 2,254 fr. 35 c. par environ 70 membres.

Il termine en constatant que le nombre des membres admis, qui n'avait été que de 14 en 1851, a été de 34 cette année.

Le président fait remarquer la bonne situation financière de la Société ; il espère que, si de nouvelles cotisations volontaires étaient encore nécessaires, elles seraient faciles à trouver.

Il met aux voix l'approbation des comptes. Cette approbation est adoptée.

Le président adresse au trésorier, au nom de la Société, des remercîments pour sa bonne et active gestion.

Il est ensuite procédé aux élections.

Sur la proposition de M. Eugène Flachat, l'assemblée décerne à l'unanimité et par acclamation la présidence honoraire à M. A. Perdonnet.

Les élections ont donné le résultat suivant :

Bureau.

Président :	M. J. Petiet ✻✻.
Vice-présidents :	MM. Vuigner (Emile) O ✻,
—	Callon (Charles),
—	Flachat (Eugène) ✻✻,
—	Polonceau (C.) ✻.
Secrétaires :	MM. Bellier (Adolphe),
—	Mathieu (Henry),
—	Lorentz (E.),
—	Yvert (Léon),
Trésorier :	Loustau (Gustave).

Comité.

MM. Yvon-Villarceau,
Degousée,
Faure,
Houel ✻,
Nozo (Alf.),
Séguin (Paul),
Thomas (Léonce) ✻,
Calla ✻,
Chobrzinsky,
Bois (Victor),

MM. Salvetat,
Barrault (Alexis),
Alcan (M.),
Cavé ✻,
Bergeron,
Mony (Stéphane) ✻
Knab,
La Salle,
Pépin-Lehalleur ✻,
Évrard.

TABLE DES MATIÈRES.

Compte-rendu des travaux des Ingénieurs civils. (N° 16, Janvier, Février, mars 1852.) Page 1.

Liste générale des Sociétaires. 5.

Mémoire n° 30. — Expériences faites sur le Calorifère de l'église Saint-Roch pendant l'hiver de 1848 à 1849, par M. F. Pottier. 15.

Note sur les chemins de fer suisses, par M. Sautter. 42.

Note sur les chemins de fer en Suisse, par M. Bridel. 51.

Note sur les résultats relatifs à l'évaluation de la puissance et des consommations produites par les machines locomotives mixtes employées au remorquage des trains de voyageurs entre Paris et Montereau sur le chemin de fer de Paris à Lyon, par M. Jules Poirée, ingénieur des ponts et chaussées. 55.

Compte-rendu des travaux des Ingénieurs civils. (N° 17, Avril, Mai, Juin 1852.) 61.

Note sur un magasin d'entrepôt de céréales construit sur le terre-plein, rive gauche, à l'extrémité Est du bassin de la Villette, par M. E. Vuigner. 65.

Note sur la pénétration des bois par des sels métalliques, par M. Goschler. (*Extrait des annales de la Société des Ingénieurs autrichiens.*) 91

Note sur les procédés de conservation des bois, par M. Schweitzer, ingénieur de la voie aux chemins de fer hanovriens (analysée par M. Ferdinand Mathias). 102.

Expériences dynamométriques pour constater la force des machines locomotives, par M. J. Poirée, ingénieur des ponts et chaussées, sous-directeur du chemin de fer de Paris à Lyon. 110.

Note sur la résistance des wagons à freins et sur le frottement de glissement, par M. J. Poirée, ingénieur des ponts et chaussées, sous-directeur du chemin de fer de Paris à Lyon. 123.

Compte-rendu des travaux des Ingénieurs civils. (N° 18, Juillet, Août, Septembre 1852.) 125.

Note sur le raccourcissement du souterrain de l'Europe au chemin de fer de Saint-Germain, par M. H. Mathieu. 129.

Mémoire n° 31. — Sur la reconstruction du pont biais de Clichy, chemin de fer de Saint-Germain, par MM. H. Mathieu et Lavalley. 134.

Note sur la fabrication des produits réfractaires, par M. Petitgand. 158.

Compte-rendu des travaux des Ingénieurs civils. (N° 19, Octobre, Novembre et décembre 1852.) 193.

Construction des ponts suspendus. 197 à 215, 217 à 221, 223 à 227, 235, 237 à 239, 255 à 260 et 263 à 267.

Théorie de la stabilité des machines en mouvement. 215 à 217, 227 à 230 247.